BAND 28 | SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

STEFFEN STREBEL

EIN BEITRAG ZUM SIMULATIONSBASIERTEN TEST VON LICHTFUNKTIONEN





Steffen Strebel

Ein Beitrag zum simulationsbasierten Test von Lichtfunktionen

SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK **BAND 28**

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Ein Beitrag zum simulationsbasierten Test von Lichtfunktionen

von
Steffen Strebel



Karlsruher Institut für Technologie
Lichttechnisches Institut

Ein Beitrag zum simulationsbasierten Test von Lichtfunktionen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Steffen Strebel, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 11. November 2021
Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Eric Sax

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu

Print on Demand 2022 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2195-1152
ISBN 978-3-7315-1208-0
DOI 10.5445/KSP/1000147909



„Enjoy each step, for in every moment there is something to learn."

John P. Strelecky

DANKSAGUNG

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als Doktorand der *Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG* in der Abteilung *Elektrik / Elektronik Systemmanagement* in Weissach und als externer Doktorand des *Lichttechnischen Instituts* am *Karlsruher Institut für Technologie* entstanden. Mit der Abgabe dieser Arbeit endet für mich eine sehr wertvolle und lehrreiche Zeit. Zum Gelingen der Arbeit hat ein großes unterstützendes Umfeld aus Instituts- und Arbeitskollegen, Mitdoktoranden und Freunden beigetragen, wovon nachfolgend nur einige wenige stellvertretend aufgeführt werden können.

Mein besonderer Dank gilt an erster Stelle meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann. Er verstand es in anregenden Diskussionen meine Arbeit konstruktiv zu fördern, mich bei Rückschlägen stets positiv auszurichten und mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite zu stehen. Ein herzlicher Dank gilt an dieser Stelle auch Prof. Dr.-Ing. Eric Sax zur Bereitschaft am Korreferat meiner Arbeit, insbesondere für die sehr gute Zusammenarbeit und das konstruktive und hilfreiche Feedback.

Durch mein Arbeitsumfeld und die abteilungsübergreifende fachliche Unterstützung und Hilfsbereitschaft meiner Kollegen und Vorgesetzten, hatte ich ideale Voraussetzungen meinen Ideen und Untersuchungen nachzugehen. Hierfür möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken. Ein besonderer Dank gilt dabei Dr. rer. nat. Günter Hetzel, Dr.-Ing. Rüdiger Dorn und Dr.-Ing. Sebastian Söhner, die diese Arbeit fachlich inspiriert und ermöglicht, sowie in zahlreichen Diskussion und kollegialer Atmosphäre unterstützt haben.

Schließlich möchte ich meinen Eltern für die Ermöglichung meiner Ausbildung danken. Rückhalt und Zuhause sind für mich unverzichtbar

und damit eine wesentliche Grundlage für das Gelingen dieser Arbeit. Ein ganz besonders herzlicher Dank gilt daher meiner Freundin Stephanie für die Teilhabe an Erfolgen und Rückschlägen, für die Geduld und das Verständnis wenn wieder einmal die Doktorarbeit den Alltag bestimmt hat und die Unterstützung bei der Erreichung meines Ziels.

Stuttgart im Dezember 2021, *Steffen Strebel*

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Intelligente Lichtfunktionen und Beleuchtungssysteme stellen in der automobilen Entwicklung ein bedeutsames Innovationsfeld dar und leisten neben Fahrerassistenzsystemen bei korrekter Funktion einen wesentlichen Beitrag zu Sicherheit und Komfort im nächtlichen Straßenverkehr [1] [2].

Die Anwendungsbereiche und Dynamik neuer Lichtfunktionen nimmt dabei stetig zu. So wandelte sich die Funktionalität von einem einfachem Wechsel statischer Lichtverteilungen, wie dem automatischen Auf- und Abblenden des Fernlichtassistenten (FLA), hin zu einer adaptiven und situativ optimierten Lichtverteilung. Basierend auf klassifizierten Objektdaten der Fahrerassistenzkamera, besteht die Hauptaufgabe in einer optimalen Ausleuchtung des eigenen Fahrbahnbereichs, ohne eine Eigenblendung oder Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu verursachen.

Die Markteinführung pixelbasierter Scheinwerfersysteme, wie dem Matrix-Scheinwerfer im Audi A8 im Jahr 2013 [3], stellt in der Entwicklung von Lichtsystemen einen Meilenstein dar, wobei 84-Pixel-Systeme, wie in [4] vorgestellt, den heutigen Stand der Technik darstellen. Hochauflösende Systeme mit bis zu $1,3$ Millionen Pixel pro Scheinwerfer [5] [6] [7] sind Stand der Forschung oder werden derzeit im Markt eingeführt [2].

Neben der Anzahl und Freiheitsgrade möglicher Lichtfunktionen, steigt die darstellbare Präzision und folglich die Anforderungen an Entwicklung, Verifikation und Validierung [2]. Zudem führen kurze Softwarereleasezyklen, vielfältig kombinierbare Architektur- und Ländervarianten sowie Softwareanpassung in verbundenen Komponenten notwendigerweise zu zahlreichen und regelmäßig wiederkehrenden Qualifikationstests. Die Fragestellung nach objektiven und effizienten Simulations- und Absicherungsmethoden gewinnt dadurch zunehmend an Bedeutung.

Eine wesentliche Absicherungsstufe im Entwicklungsprozess eines Automobilherstellers (OEM[1]) ist der Integrations- und Systemtest, der bei Lichtfunktionen überwiegend mit Prototypen und Erprobungsträgern im realen Straßenverkehr oder auf dem Prüfgelände durchgeführt wird [1] [2].

Statische und einzelne dynamische Szenen können mit hohem Aufwand auf Teststrecken nachgestellt und evaluiert werden, sind jedoch durch die Vielfältigkeit möglicher Szenarien und die Häufigkeit notwendiger Qualifikationen für umfassende und regelmäßige Evaluierung nicht geeignet. In Erprobungen unter realen Verkehrsbedingungen ist die statistische Vielfalt vorhanden, die notwendige Kontrollierbarkeit und Referenz für reproduzierbare und objektive Bewertungen ist hingegen kaum erreichbar. Weiterhin erschwert die Abhängigkeit von Tageszeit und Witterung in beiden Evaluierungsmethoden zusätzlich die Testdurchführung und -bewertung. [1] [2]

Die genannten Herausforderungen motivieren die Entwicklung und Untersuchung neuer simulationsbasierter Methoden, mit der Anteile von Realerprobungen von Lichtfunktionen an Testsysteme mit real integrierten Hardwarekomponenten übertragen werden können und somit

[1] Kurzform von Original-Equipment-Manufacturer (engl.)

reproduzierbare und objektive Evaluierungen unter kontrollierbaren Bedingungen ermöglichen.

1.2 ZIELSETZUNG UND EINGRENZUNG DER ARBEIT

Die vorliegende Dissertation leistet einen Beitrag zum simulationsbasierten und reproduzierbaren Test von Lichtfunktionen an Hardware-in-the-Loop (HiL)-Testsystemen. Ziel ist die Weiterentwicklung bestehender, sowie die Entwicklung und Untersuchung neuer Methoden und Ansätze, die eine Übertragung von realen Nachtfahrten in objektive und kontrollierbare Testumgebungen ermöglicht. Der Fokus liegt dabei sowohl auf der Anbindung der Lichtfunktionswirkkette, im speziellen der Fahrerassistenzkamera, als auch auf Testmethoden zur Bewertung pixelbasierter Lichtfunktionen.

Die Grundlage bildet eine Analyse des Standes der Technik bereits publizierter simulationsbasierter Testsysteme für Lichtfunktionen mit realen Hardwarekomponenten. Dabei werden sowohl Herausforderungen und Methoden zur Stimulation der Fahrerassistenzkamera in virtuellen Nachtfahrten als auch Methoden zur objektiven Absicherung der integrierten Lichtfunktionswirkkette analysiert und diskutiert.

Unter Berücksichtigung des Standes der Technik wird bezüglich der Bildwiedergabe virtueller Nachtfahrten mit realer Fahrerassistenzkamera folgende Fragestellung untersucht:

> Wie kann durch eine effiziente Lichtnutzung ein hoher Kontrast für virtuelle Nachtfahrten mit realer Fahrerassistenzkamera erreicht werden?

Nach einer konzeptionellen Evaluierung wird die neue Methode anhand einer prototypische Umsetzung experimentell untersucht und der Fortschritt hinsichtlich dem aktuellen Stand der Forschung aufgezeigt.

Neben der Betrachtung der Sensor-Stimulation assistierender Lichtfunktionen steht eine gesamtheitliche Betrachtung der Testumgebung integrierter Lichtfunktionen im Fokus der Untersuchungen. Dazu wird folgende Leitfrage behandelt:

> Inwiefern kann eine Methodik für HiL-Testsysteme entwickelt werden, die eine objektive und reproduzierbare Bewertung von Lichtfunktionen durch Metriken ermöglicht?

Hierbei wird zunächst eine geeignete Testumgebung für die Lichtfunktionswirkkette abgeleitet. Durch die Erweiterung um eine neue Synchronisations-Methode können in die Bewertung auch geometrische und zeitliche Bezugsgrößen in Verbindung mit einer virtuellen Umfeldsimulation miteinbezogen werden. Basierend auf den Ergebnissen wird die neue Methodik hinsichtlich des aktuellen Standes der Technik diskutiert.

1.3 AUFBAU DER ARBEIT

Die Dissertation ist in sechs Kapitel unterteilt. Im *ersten Kapitel* wird die Entwicklung neuer Methoden für den simulationsbasierten Test von Lichtfunktionen motiviert und die betrachteten Untersuchungsfelder eingegrenzt.

Die in *Kapitel 2* definierten Begrifflichkeiten und die Vorstellung der Grundlagen des automobilen Entwicklungsprozesses bilden die Basis dieser Arbeit. Dabei stehen Aufgaben und Anwendungen simulationsbasierter Testmethoden wie X-in-the-Loop (XiL)-Testsysteme im Mittelpunkt. Anschließend werden die Wirkungsweisen von Lichtfunktionen und deren Wirkkette erläutert. Der Fokus liegt hierbei auf pixelbasierten Systemen und dem aktuellen Stand der Technik adaptiver und assistierender Lichtfunktionen.

In *Kapitel 3* wird der Stand der Technik hinsichtlich aktueller Literatur zu simulationsbasierten Testumgebungen von Lichtfunktionen analysiert. Dabei werden die Leistungsfähigkeit derzeitiger Testsysteme in Bezug auf den funktionalen Test sowie Konzepte zur Anbindung und Stimulation der Fahrerassistenzkamera hinsichtlich der Darstellung hoher Kontraste in virtuellen Nachtfahrten vorgestellt und diskutiert.

Den ersten Schwerpunkt dieser Arbeit bildet *Kapitel 4*. Dieses basiert auf der Analyse des Standes der Technik im *dritten Kapitel* und leitet daraus ein neues, projektorbasiertes Konzept zur effizienten Erzeugung hoher Kontraste für virtuelle Nachtfahrten ab. Zwei Methoden werden dieser Idee folgend konzeptionell ausgearbeitet und evaluiert: Eine basierend auf retroreflektierenden Partikeln und eine zweite basierend auf holographischen Folien. Die vielversprechendere Methode mit holographischer Folie wird prototypisch umgesetzt und, vergleichend zu aktuellen Lösungen aus der Literatur, evaluiert.

Die vorangehenden Evaluierungen bilden im *fünften Kapitel* die Basis für die Ableitung einer Testumgebung zur Absicherung von pixelbasierten Lichtfunktionen an einem HiL-Testsystem. Diese wird um Synchronisationsmethoden erweitert, die eine Integration objektivierender Metriken wie die Bewertung der Ausblendfunktion ermöglichen. Das erarbeitete Konzept wird prototypisch umgesetzt und der erreichte Fortschritt zum Stand der Technik aus *Kapitel 3* herausgestellt und diskutiert.

In *Kapitel 6* erfolgt die Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Untersuchungen.

Kapitel 2

Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel werden für das Verständnis dieser Arbeit notwendige Grundlagen erläutert sowie Koordinatensysteme eingeführt und Begrifflichkeiten definiert.

In Abschnitt 2.1 wird anhand des V-Modells eine Übersicht über aktuelle simulationsbasierte Testmethoden in der automobilen Entwicklung vorgestellt. Dabei stehen besonders X-in-the-Loop-Testsysteme im Mittelpunkt. Im anschließenden Abschnitt 2.2 wird die Wirkkette und Funktionsweise aktueller Lichtfunktionen aufgezeigt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf pixelbasierten Lichtsystemen.

2.1 Verifikation und Validierung im automobilen Entwicklungsprozess

Softwareentwicklung, wie auch die Entwicklung neuer Lichtfunktionen, erfolgt in der Automobilindustrie überwiegend arbeitsteilig mit Zulieferern. Während der OEM in frühen Phasen mittels Rapid Prototyping Methoden und Probandenstudien die Anforderungen neuer Systeme evaluiert, werden Entwurf und Implementierung sowie teilweise auch die Teilintegration, häufig an den Zulieferer vergeben. Die Integration in das Gesamtfahrzeug erfolgt schließlich beim Automobilhersteller. Diese Arbeitsteilung erfordert eine hohe Systematik im Entwicklungsprozess. [8]

Ziel ist es die Entwicklung, Verifikation und Validierung effektiv und effizient zu gestalten [9]. Eine Durchführung aller Entwicklungsschritte und Tests in realen Versuchsfahrten ist nicht zielführend, da beispielsweise die Testbedingungen nur schwer kontrollierbar sind, objektive Referenzen fehlen oder die prinzipielle Integrierbarkeit und Testbarkeit vom Reifegrad weiterer Komponenten abhängt. Stattdessen beschreiben Vorgehensmodelle wie das V-Modell eine etablierte Vorgehensweise für die Produktentwicklung und Absicherung.

Die Begriffe *Verifikation* und *Validierung* werden in dieser Arbeit analog zur gängigen Literatur [9] [10] [11] verwendet.

2.1.1 V-MODELL

Das 1992 veröffentlichte V-Modell besteht bereits in mehreren Weiterentwicklung als V-Modell 97 [12] und V-Modell XT [13]. Es beschreibt ein phasenorientiertes Vorgehensmodell für die Produktentwicklung und findet im automobilen Entwicklungsprozess auch für weitestgehend in Software abgebildete Funktionen Anwendung. Der im Jahr 2011 veröffentlichte Standard ISO[1] 26262 [14] für sicherheitskritische elektrische/elektronische (E/E) Systeme und Komponenten in Kraftfahrzeugen orientiert sich ebenfalls am V-Modell [15].

Das V-Modell stellt die Systemerstellung chronologisch über den Buchstaben „V“dar, siehe Abbildung 2.1. Die absteigende linke Seite beschreibt in abnehmender Abstraktion die Ermittlung von Anforderungen, Architektur und Design des Produkts bis auf System- und Komponentenebene und resultiert im Komponentenentwurf beziehungsweise

[1] Kurzform für Internationale Organisation für Normung

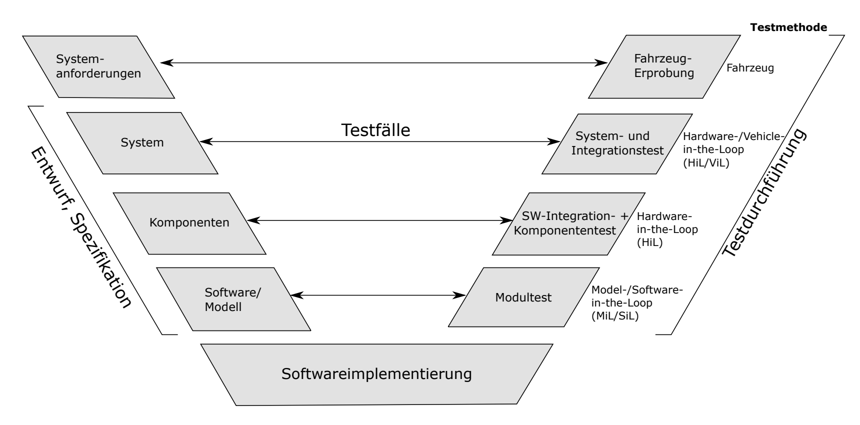


Abbildung 2.1.: Das V-Modell im automobilen Entwicklungsprozess, nach [16], ergänzt um Zuordnung von Testmethoden

dessen Implementierung [17]. Die Anforderungen werden in Form von Spezifikationen in *Lastenheften* zusammengefasst.

Auf der aufsteigenden rechten Seite stehen den Anforderungen der linken Seite jeweils korrespondierende Integrations- und Teststufen gegenüber und werden entsprechend den Abstraktionsebenen des V-Modells als *Modultest*, *Komponententest*, *Integrationstest* und *Systemtest* bezeichnet. Durch das Testen gegen die definierten Spezifikationen der linken Seite des V-Modells kann das jeweilige Testobjekt verifiziert werden [17]. Die in den Qualifikationsphasen ermittelten Testergebnisse und gefundenen Fehler werden an den Zulieferer oder die verantwortlichen Entwickler zurückgeführt und ermöglichen neben der Ermittlung des Reifegrads auch eine iterative Produktverbesserung.

Ein *Testfall* besteht, in Anlehnung an das Glossar der ISTQB[2][18], aus einer Menge an Vorbedingungen (PRE[3]), Aktionen (ACT[4]) und dem je-

[2] Kurzform für International-Software-Testing-Qualifications-Board (engl.)
[3] Kurzform von Precondition (engl.)
[4] Kurzform von Action (engl.)

weiligen erwarteten Ergebnis (ER[5]), die zusammengefasst in Form einer *Testspezifikation* dokumentiert sind. Eine Testspezifikation wird dabei beispielsweise aus einer Kundenfunktionsspezifikation im zugehörigen Lastenheft abgeleitet. Das bei der Testdurchführung ermittelte *Testergebnis* spiegelt die Erfüllung der jeweiligen Anforderung wieder. Die in einem Qualifizierungszeitraum durchzuführenden konkreten Testfälle werden in einem *Testfallkatalog* zusammengefasst.

Die vorgestellten aus Anforderungen abgeleiteten Tests können durch szenariobasierte Tests ergänzt werden. Die Testfälle werden dazu aus anwendungsnahen Szenarien abgeleitet [18].

Werden die Tests ohne Wissen über die genaue innere Struktur und Zustände des Testobjekts durchgeführt, wird dies *Black-Box-Test* genannt. Testfälle werden hierbei bezüglich der Schnittstellen des Testobjekts definiert. [11]

Für eine vertiefende Betrachtung wird auf Literatur [8] [11] verwiesen.

2.1.2 SIMULATIONSBASIERTER TEST MITTELS X-IN-THE-LOOP METHODEN

Die Anwendung von Verifikations- und Validierungsmethoden tragen erheblich zum Wissensgewinn einer erfolgreichen Produktentwicklung bei und stellen folglich eine zentrale Aktivität im Entwicklungsprozess dar [9]. Simulationsbasierte Methoden wie X-in-the-Loop ermöglichen hierbei eine virtuelle Erprobung von Funktionen und Wirkketten und somit die Nachstellung realer Fahrmanöver unter objektiven und reproduzierbaren Bedingungen. Eine Durchgängigkeit kann durch eine Übertragung der Manöver und Bewertungsmethodik aus dem realen Fahrversuch in die Simulation erreicht werden.

[5] Kurzform von Expected Result (engl.)

Tabelle 2.1.: Anteil von virtuellen (v) und realen (r) Komponenten der verschiedenen XiL-Testmethoden, nach [19]

	MiL	**SiL**	**HiL-Teilverbund**	**ViL**	**Fahrversuch**
Funktions-Code	v	**r**	**r**	**r**	**r**
Steuergerät	v	v	**r**	**r**	**r**
System	v	v	**r**	**r**	**r**
Fahrzeug	v	v	v	**r**	**r**
Fahrer	v	v	v	v/**r**	**r**
Erlebbarkeit	v	v	v	**r**	**r**
Verkehr/Umfeld	v	v	v	v	**r**

Mit der XiL-Testmethodik werden Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL), Hardware-in-the-Loop (HiL) und Vehicle-in-the-Loop (ViL) Methoden zusammengefasst. Diese Methoden beschreiben die Simulation von Teilen des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug-Umwelt zum Test des darin eingebetteten Testobjekts. Die XiL-Testsysteme unterscheiden sich, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, durch den Anteil der integrierten realen und virtuellen Teilsysteme und korrespondieren mit den Abstraktionsebenen des V-Modells, vergleiche Abbildung 2.1.

Das *System-Under-Test* (SuT) wird auch als *Testobjekt* bezeichnet. Die Gesamtheit aller im Testsystem integrierten Modelle, Realteile und Software, die für einen Test des SuT notwendig sind, heißt *Testumgebung*.

Die Schnittstellen des Testobjekts werden dazu auf die im Testfall spezifizierte Weise stimuliert und die Reaktion am Funktionsausgang der Wirkkette bewertet. Dabei können sowohl Open-Loop-Tests, mit simulierten oder aufgezeichneten Daten, als auch Closed-Loop-Tests, mit modellierter Regelstrecke, durchgeführt werden. Der Begriff *in-the-Loop* impliziert das Schließen des Regelkreises des SuT über die Testumgebung, ist jedoch auch für offene Testsysteme gebräuchlich, vergleiche [11] für HiL. Beide Varianten werden auch in dieser Arbeit zur *in-the-Loop*-Methodik zusammengefasst. Die Güte der simulierten Eingangsdaten,

und damit die Validität der modellierten Testumgebung, hat dabei einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse [17].
Zur Berechnung von virtuellen Sensordaten werden in simulationsbasierten Testmethoden für den Test von Fahrerassistenzfunktionen virtuelle Umfeldsimulationen wie *Virtual Test Drive* (VTD) [20] oder *CarMaker* [21] eingesetzt. Über offene Formate wie *OpenDRIVE* [22] ist es möglich, statische Strecken zu modellieren, die anschließend in Form von *OpenSCENARIO*-Beschreibungen [23] um die dynamischen Anteile erweitert werden können. Die resultierende Test-Szene kann schließlich deterministisch und automatisiert im virtuellen Fahrversuch durchfahren werden.

MODEL- UND SOFTWARE-IN-THE-LOOP

In MiL-Testsystemen stellt das Testobjekt beispielsweise ein mit Hilfe von modellbasierten Entwicklungsumgebungen wie MATLAB/Simulink erstelltes funktionales Modell dar. Diese Methodik ermöglicht in frühen Phasen der Entwicklung Aussagen zur Funktionalität und Spezifikation, die bei Rückführung zu schnellen Anpassungen in Konzepten und Entwicklungen führen.
Als Testobjekt in SiL-Testsystemen wird ein implementierter Programmcode der Serienfunktion bezeichnet, der beispielsweise vor der Integration auf das Steuergerät getestet werden kann.
Die Testumgebung besteht jeweils aus den relevanten Sensor-, Fahrer- und Fahrzeugmodellen und kann für die SiL-Methodik um weitere Softwaremodule bis hin zu vollständig virtualisierten Steuergeräten im Verbund erweitert werden. Die Stimulationsdaten können neben modellbasierten Ansätzen aus aufgezeichneten Fahrzeugerprobungen resimuliert und variiert werden, vergleiche [24].

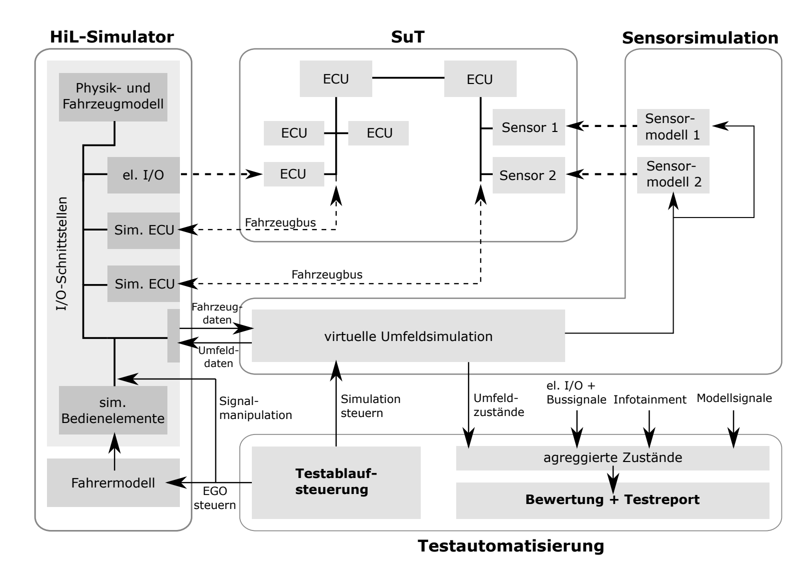


Abbildung 2.2.: Schematische Darstellung der Testumgebung eines HiL-Testsystems für Fahrerassistenzsysteme mit einem Steuergeräteverbund als SuT

HARDWARE-IN-THE-LOOP

In HiL-Testsystemen ist die Software auf dem Steuergerät integriert. Bezogen auf das V-Modell wird je nach Teststufe ein einzelnes Steuergerät oder ein Steuergeräteverbund an einem HiL-Simulator betrieben, siehe Abbildung 2.2. Nicht real integrierte Komponenten, wie zusätzliche Steuergeräte, Sensorik, Aktorik oder der Fahrer, werden durch Modelle und Ersatzlasten dargestellt. Diese bilden die Testumgebung und stellen sicher, dass integrierte Steuergeräte in einem möglichst fehlerfreien Zustand und für den Testzweck geeignet betrieben werden können.

Ein HiL-Simulator besteht aus einem echtzeitfähigen Rechner zur Ausführung dieser Modelle und stellt Schnittstellen zu Fahrzeug-

Bussystemen und weiterer Steuergeräte-I/O[6] zur Verfügung. Neben der Schnittstellensimulation können beispielsweise die gezielte Erzeugung elektrischer Fehler oder auch Busmanipulationen für die Testdurchführungen genutzt werden.

Über eine *Testablaufsteuerung* ist ein Testfall automatisiert durchführ- und steuerbar. Dazu kann neben der direkten Signalmanipulation auch über ein *Fahrermodell* und virtuelle Bedienelemente, wie beispielsweise einem modelliertem Bremspedal oder Lenkrad das EGO-Fahrzeug (Fahrzeug des SuT) gesteuert werden. Wird dem Fahrermodell Information der virtuellen Umwelt zugeführt, kann über ein Regelalgorithmus automatisiert die Spur gehalten oder modellierte Fahrmanöver ausgeführt werden.

Über aggregierte Zustände kann ein durchgeführter Testfall hinsichtlich der erreichten PRE, ACT und ER-Bedingungen bewertet werden. Dazu werden je nach Bedarf Bussignale, el. I/O, Modellsignale und Infotainmentzustände herangezogen. Die Validität der zur Bewertung erforderlichen Signale und Signalbeziehungen muss für eine belastbares Testergebnis sichergestellt sein.

Abbildung 2.3 zeigt ergänzend die Signalverarbeitungskette von Umfeldsensoren für Fahrerassistenzsysteme und die daraus abgeleiteten Einspeisepunkte im SuT. Die Integration dieser Sensoren zum Closed-Loop-Test von Fahrerassistenzsystemen, erfordert die Erweiterung des Testsystems um eine virtuelle Umfeldsimulation (VU) und Sensormodelle. Die Berechnung von virtuellen Sensordaten erfolgt aus den zu jedem Rechenschritt bekannten Koordinaten und Zuständen aller Simulationsobjekte der Umfeldsimulation. Das Ziel an HiL-Testsystemen ist nicht der Test der Wahrnehmungsfunktion der Sensoren, wie beispielsweise der Klassifikationsgüte einer Fahrerassistenzkamera, sondern die valide

[6] Kurzform von Input/Output (engl.)

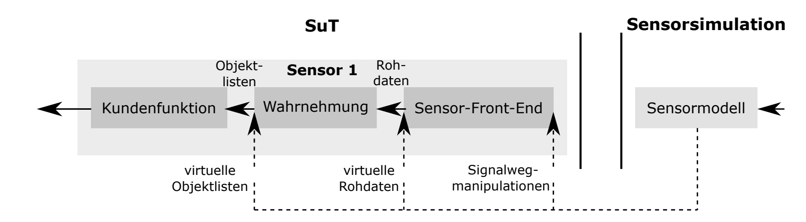


Abbildung 2.3.: Vereinfachte Darstellung der Signalverarbeitungskette von Fahrerassistenzsensoren und konzeptionelle Möglichkeiten der Anbindung an ein HiL-Testsystem. Hier dargestellt mit auf Sensorsteuergerät integrierter Kundenfunktion

Stimulation der vernetzten Kundenfunktionen im Gesamtsystem. Dies wird durch ideale Sensormodelle erreicht, die zu einem deterministisch arbeitenden Sensorverhalten führen.

Folglich findet überwiegend die Einspeisung von virtuellen Objektlisten statt, womit die Wahrnehmungsschicht vollständig übersprungen wird. Aber auch virtuelle Rohdaten-Einspeisung oder Signalwegmanipulation finden in derzeitigen HiL-Testsystemen Anwendung. Einzelne Sensoren, wie die Fahrerassistenzkamera, können auch über einen Bildschirm oder einen Projektor mit einem virtuellen Umfeld stimuliert werden. Diese Methodik der Einspeisung unterliegt jedoch Einschränkungen und Herausforderungen vor allem im Kontext von Nachtfahrten, vergleiche Abschnitt 3.2.2. Für eine tiefergehende Betrachtung zu Sensorsimulationen für HiL-Testsysteme wird auf die Literatur [25] [26] verwiesen.

Vorteile der HiL-Testmethodik sind die hohe Objektivität und Reproduzierbarkeit der Fahrmanöver, der daraus ableitbaren Vergleichbarkeit von Regressionstests und der Möglichkeit der Testautomatisierung auf einer hohen Integrationsstufe.

VEHICLE-IN-THE-LOOP

ViL-Methoden ermöglichen die Nutzung des realen Versuchfahrzeugs auf dem Prüfgelände oder einem Rollenprüfstand in Verbindung mit einer echtzeitfähigen virtuellen Umgebung.

Zum Test von Fahrerassistenzsystemen werden gängige HiL-Methoden übertragen und über Busmanipulationen oder Sensoreinspeisungen die Fahrzeugbewegungsdaten und Umfelddaten eingespielt und die Kundenfunktionen je nach Testzweck stimuliert. Über eine Rückkopplung zur virtuellen Umfeldsimulation kann hier ebenfalls eine Closed-Loop-Simulation dargestellt werden.

2.1.3 REALER FAHRVERSUCH

Der reale Fahrversuch, in der Literatur auch als Erprobungsfahrt oder Felderprobung bezeichnet, findet auf dem Prüfgelände oder im öffentlichen Straßenverkehr statt. Für diese Versuche werden Prototypen oder Vorserienfahrzeuge mit zusätzlicher Messtechnik zur Signalüberwachung ausgerüstet. Zum Test einzelner Funktionen werden sowohl konkrete Szenarien nachgestellt als auch gezielt Situationen im Straßenverkehr gesucht. Viele relevante Testszenarien werden erst im realen Fahrversuch entdeckt und, falls relevant und ökonomisch sinnvoll, an simulationsbasierte Testsysteme übertragen, vergleiche [19].

Weitere Vorteile des realen Fahrversuchs sind die Bewertbarkeit der Fahrzeug-, Sensor- und Funktionsperformance unter realen Bedingungen und Wetterverhältnissen ohne dass auf abstrahierende Modelle und Simulationen zurückgegriffen werden muss. Subjektive Bewertungen und Optimierungen, wie die Homogenität einer Lichtverteilung oder die Parametrierung eines flüssig wirkenden digitales Kurvenlichts, sind

fast ausschließlich an realen Bauteilen möglich. Ebenfalls findet die Applikation und Parametrierung der Funktionen derzeit größtenteils im realen Fahrversuch statt.

Der reale Fahrversuch stellt folglich nach wie vor ein essentielles Element für die Verifikation und Validierung dar. Der Test von Fahrerassistenzsystemen unterliegt durch Testumfang, System- und Testfallkomplexität jedoch hohen Aufwänden, die nicht vollständig mit dem realen Fahrversuch abgedeckt werden können, vergleiche [19].

Neben hohen Personalaufwänden stellen hohe Kosten für die Aufrüstung und Aufbauten der Fahrzeuge, die limitierte Anzahl an insgesamt verfügbaren Fahrzeugen und die kurzen Software-Releasezyklen eine Herausforderung dar. Zusätzlich erschweren genannte Abhängigkeiten von Umwelteinflüssen wie Wetter oder Tageszeit, die schwer zu erreichende Reproduzierbarkeit und die fehlende Referenz eine objektive Bewertung von Softwarefunktionen. Rückschlüsse auf Fehlerursachen, wie die Unterscheidung von Sensor- oder Funktionsfehlern, sind bei verteilten Funktionen und komplexen Wirkketten nur mit hohem Aufwand möglich.

2.2 WIRKKETTE UND FUNKTIONSWEISE VON LICHTFUNKTIONEN

Während klassische Lichtsysteme auf den manuellen Wechsel zwischen Abblendlicht und Fernlicht durch den Fahrer angewiesen sind, stellen moderne Systeme automatisiert Lichtverteilungen (LV) zur Verfügung.

Wie in Abbildung 2.4 dargestellt, besteht die Wirkkette sensorgestützter Lichtfunktionen hauptsächlich aus den Komponenten Fahrerassistenzkamera mit Bilddatenerfassung und -verarbeitung (BV), der Datenverarbeitung in der Lichtfunktion (LF) und der Umsetzung der Lichtverteilung

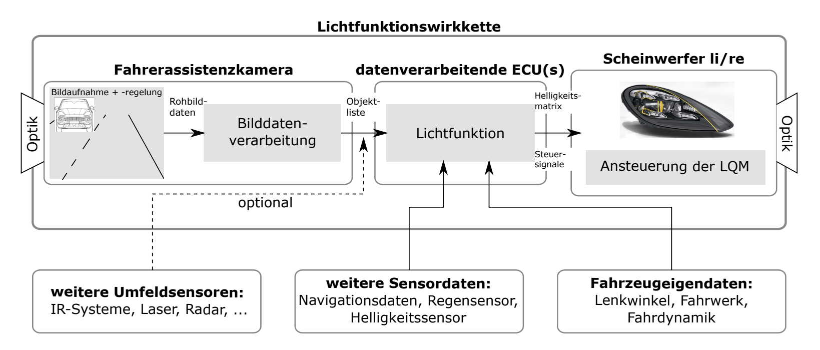


Abbildung 2.4.: Logische Systemsicht auf die Wirkkette sensorgestützter Lichtfunktionen. Scheinwerfergrafik aus [27]

im Scheinwerfer (SW). Die Objektlisten der Kamera können durch eine Sensordatenfusion mit weiteren Sensoren wie Radar[7], Lidar[8] sowie auf das eigene Fahrzeug bezogene Bewegungsdaten unterstützt werden. Zur Detektion von potentiell unbeleuchteten Objekten wie Fußgängern, Radfahrern oder Wildtieren können optional zusätzlich aktive und passive Infrarotsysteme (IR-Systeme) zum Einsatz kommen.

Mit Hilfe der Fahrerassistenzkamera werden vorausfahrende und entgegenkommende Verkehrsteilnehmer und Verkehrsobjekte erfasst. Die aus dem Kamerabild extrahierten Objektinformationen werden an die Lichtfunktion übergeben. Mit den bekannten Anbaupositionen von Kamera und Scheinwerfer wird schließlich eine situativ optimale Lichtverteilung bestimmt, die in Form von Steuersignalen an die Scheinwerfersteuergeräte (SW-ECUs[9]) zur Umsetzung weitergegeben werden. Die SW-ECUs steuern schließlich das entsprechende Lichtquellenmodul (LQM) wie vorgegeben an. Je nach Scheinwerfertechnologie können die Signale die horizontale und vertikale Stellmotorik und/oder die umzusetzen-

[7] Kurzform von Radio-Detection-And-Ranging (engl.)
[8] Kurzform von Laser-Detection-And-Ranging (engl.)
[9] Kurzform von Electronic-Control-Units (engl.)

de Lichtverteilung beinhalten. Bei pixelbasierten Systemen wird die gesamte Lichtverteilung über eine *Helligkeitsmatrix* von der Lichtfunktion vorgegeben. Ein einzelnes Element der Helligkeitsmatrix wird im Rahmen dieser Arbeit als *Lichtpixel* bezeichnet.

Die *zentrale Systemarchitektur* findet heute in den Fahrzeugen überwiegend Anwendung. Dabei kann die Lichtfunktion in einem zentralen Steuergerät mit Sensordatenverarbeitung und weiteren Funktionen verortet sein oder auf einem separaten Lichtsteuergerät [28] [29] [30] [31] [32]. Für die Verbindung von Lichtfunktionssteuergeräten und Scheinwerfern sind überwiegend CAN[10]-Bussysteme im Einsatz.

Die Integration hochauflösender Scheinwerfersysteme in die Fahrzeugarchitekturen, vergleiche Abschnitt 2.2.3, führt zu einer stark ansteigenden Datenmenge der Steuersignale. Untersuchungen von BENDERMAN ET AL. [29] ergeben in einer worst-case Betrachtung eine Busauslastung des herkömmlichen CAN-Busses von bereits über 45 %[11], bei angenommenen 6-bit Dimmstufen für 90 ansteuerbare Elemente pro Scheinwerfer.

Ausweg bieten die in [28] vorgeschlagenen leistungsstärkeren Kommunikationssysteme wie Video- und Automotive-Ethernet oder eine Verlagerung der Lichtfunktion in das Scheinwerfersteuergerät. Bei dieser *dezentralen Systemarchitektur* werden lediglich Objektinformationen an das Scheinwerfersteuergerät gesendet und dort die optimale Lichtverteilung für den linken und rechten Scheinwerfer getrennt errechnet.

2.2.1 FAHRERASSISTENZKAMERA

Das System Fahrerassistenzkamera besteht aus den Elementen Bildaufnahme, Bildaufnahmeregelung, Bildverarbeitung und Kommunikati-

[10] Kurzform von Controller-Area-Network (engl.)
[11] Enthalten sind bereits 15 % für Status- und weitere Basis-Kommunikationssignale.

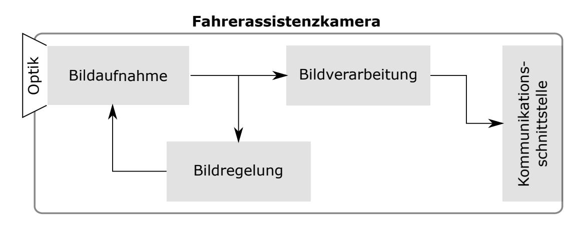


Abbildung 2.5.: Logische Systemarchitektur einer Fahrerassistenzkamera, nach PUNKE ET AL. [33]

on zum Fahrzeug (siehe Abbildung 2.5). Die Bildverarbeitung kann auch auf einem separatem Steuergerät verortet und über leistungsfähige Schnittstellen wie LVDS[12] oder Automotive-Ethernet verbunden sein. [33]

Die Fahrerassistenzkamera wird hinter der Windschutzscheibe in Höhe des Rückspiegels angebracht. Im Serienbetrieb kommen sowohl Mono- als auch Stereokamerasysteme zum Einsatz. [33] Über eine lichtstarke Optik wird die Verkehrsszene auf einen Bildsensor abgebildet und ist durch photoempfindliche Bildpixel ortsaufgelöst abtastbar. Das Sichtfeld der Kamera wird dabei als *Field-of-View* (FOV) bezeichnet. Das vollständige Bild wird nach der Aufnahme in einer systemspezifischen Kamerafrequenz f_K an die Bildverarbeitung weitergegeben.

Im Serienbetrieb finden sich heutzutage überwiegend CMOS[13] Sensoren. Um Farbinformation aus den monochromen Sensoren extrahieren zu können, werden Farbfilter vor den Sensorpixeln angebracht. Für den Einsatz von assistierenden Lichtfunktionen ist die Unterscheidung von weißen Frontscheinwerfer und roten Rücklichter von besonderer Bedeutung. Eine typische Umsetzung findet sich in rot-monochromen CFAs[14]

[12] Kurzform von Low-Voltage-Differential-Signaling (engl.)
[13] Kurzform von Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor (engl.)
[14] Kurzform von Color-Filter-Arrays (engl.)

oder auch RCCCs[15] bei der anteilig auf einen Bildpixel mit Rotfilter, drei Bildpixel ohne Filter vorhanden sind. Um die hohen Leuchtdichtekontraste, wie sie auch bei Nachtfahrten auftreten, in einem Kamerabild abbilden zu können, sind Dynamikumfänge von bis zu 120 dB notwendig. Typische Werte für die Kontrastauflösung liegen im Bereich von 8 bis 12 bit. Die Fähigkeit zur Abbildung hoher Kontraste spielt in Nachtfahrten vor allem in Szenen mit entgegenkommenden Frontscheinwerfern eine zentrale Rolle. [33]

Die Bildaufnahmeregelung steuert die Belichtungszeit und den Weißabgleich. Die anschließende Bildverarbeitung führt zunächst vorverarbeitetende Schritte wie Gammakorrektur oder Verzeichnungskorrektur durch. Im Anschluss werden mittels Methoden des Maschinellem Lernens Objektinformation wie Klasse, Distanz und Größe von Verkehrsobjekten extrahiert und als *Objektliste* nachgelagerten Funktionen zur Verfügung gestellt. Für eine valide Verwendung der geometrischen Objektdaten in nachgelagerten Assistenzfunktionen muss die Fahrerassistenzkamera intrinsisch und extrinsisch kalibriert sein. [33]

2.2.2 LICHTFUNKTIONEN

Nachfolgend werden die Begrifflichkeiten und Grundlagen wesentlicher Lichtfunktionen eingeführt. Die Klassifikation von adaptiven und assistierenden Lichtfunktionen werden in Anlehnung an KHANH ET AL. [31] durchgeführt.

[15] Kurzform von Red-Clear-Clear-Clear (engl.)

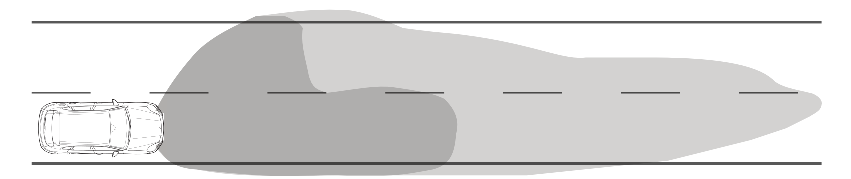


Abbildung 2.6.: Schematische Darstellung von Abblend- und Fernlichtverteilung im Straßenverkehr aus der Vogelperspektive, nach [34]

ABBLEND- UND FERNLICHT

Als klassische Grundlichtverteilungen stehen dem Fahrer das statische *Abblendlicht* und *Fernlicht* zur Verfügung.

In den frühen Anfängen der Automobilentwicklung fand zunächst ausschließlich das Fernlicht (engl. driving beam) zur Ausleuchtung im Straßenverkehr Anwendung. Als Kompromiss zwischen Minimierung von Blendung und Maximierung der Erkennbarkeitsentfernung, wurde mit zunehmenden Verkehr das Abblendlicht (engl. passing beam) als Begegnungslicht eingeführt. [31]

Seit 1957 ist diese asymmetrisch gestaltet, um den eigenen Fahrbahnrand optimal auszuleuchten ohne den Gegenverkehr damit zu blenden [8]. Der Übergang zwischen dem beleuchteten Bereich der Lichtverteilung in den unbeleuchteten Bereich wird als *Hell-Dunkel-Grenze* (HDG) bezeichnet.

Weiterhin ist für das Abblendlicht eine Neigung von 1 % zur Fahrbahn hin vorgeschrieben [35] [36]. Abhängig von der Scheinwerferanbauhöhe resultiert daraus eine maximale Beleuchtungsreichtweite von 55 m bis 85 m [31]. Eine schematische Veranschaulichung der charakteristischen Abblend- und Fernlichtverteilung aus der Vogelperspektive ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

Für die Abstrahlcharakteristik beider Grundlichtverteilungen sind in ECE[16]-Regelungen minimal und maximal zulässige Beleuchtungsstärken oder Lichtstärken für definierte Abstrahlwinkel aus Sicht des Scheinwerferkoordinatensystems vorgegeben. Hierzu sei auf die entsprechenden ECE-Regelungen [35] [37] verwiesen.

ADAPTIVE LICHTFUNKTIONEN

Die Einführung der ECE-R-123 [36] für AFS[17]-Lichtverteilungen im Jahr 2007 erweitert die Grundlichtverteilung um weitere charakteristische Abblendlichtverteilungen ohne auf die Verwendung einer Fahrerassistenzkamera angewiesen zu sein. *Adaptive Lichtfunktionen* passen die Lichtverteilung situationsadaptiv auf Basis von Navigationsdaten, Wetterverhältnissen und Fahrzeugeigendaten wie Nickwinkel, Lenkradwinkel und Geschwindigkeit automatisiert an. Man unterscheidet zwischen Stadtlicht, Landstraßenlicht, Schlechtwetterlicht und Autobahnlicht. Für pixelbasierte Lichtfunktionen sind diese als abrufbare statische Helligkeitsmatrizen hinterlegt. Für eine ausführliche Erläuterung dieser Lichtfunktionen wird auf die Literatur [31] verwiesen.

Das dynamische Kurvenlicht und die Leuchtweitenregelung (LWR) können zudem, abhängig von Nickwinkel oder Lenkradwinkel, zu einer digitalen horizontalen oder vertikalen Verschiebung der in der Helligkeitsmatrix abgebildeten Lichtverteilung führen. Alternativ ist die Lichtverteilung auch durch eine Drehung mittels Schrittmotoren an die Fahrsituation anpassbar, vergleiche 2.2.3.

Durch erkannte Situationswechsel im Straßenverkehr kann von der Lichtfunktion automatisiert ein Zustandswechsel in eine andere geeig-

[16] Kurzform von Economic-Commission-for-Europe (engl.)
[17] Kurzform von Advanced-Front-Lighting-System (engl.)

nete Lichtverteilung ausgeführt werden. Der Wechsel zwischen den Lichtverteilungen kann unmittelbar oder mit einem weichen Übergang gestaltet sein.

ASSISTIERENDE LICHTFUNKTIONEN

Als *assistierende Lichtfunktionen* oder *lichtbasierte Fahrerassistenzfunktionen* werden Funktionen bezeichnet, die mit örtlich und zeitlich veränderlicher Lichtverteilung auf erfasste Verkehrsteilnehmer und -objekte reagieren. Die Detektion und Klassifikation findet hierfür mittels einer Fahrerassistenzkamera statt, vergleiche Abschnitt 2.2.1.

Die einfachste Umsetzung einer kamerabasierten Funktion findet sich im *Fernlichtassistent*, der unter Berücksichtigung der erfassten Verkehrsteilnehmer automatisiert zwischen Abblendlicht und Fernlicht umschaltet.

Die *gleitende Leuchtweitenregelung* (GLW) ermöglicht einen fließenden Übergang zwischen Abblendlicht und Fernlicht. Die Leuchtweite der Lichtverteilung wird durch die Neigung des Scheinwerfers oder einer Blende so geregelt, dass die Fahrbahn bis hin zu den erfassten Verkehrsteilnehmern ausgeleuchtet wird.

Abbildung 2.7 veranschaulicht die Funktionsweise des *blendfreien Fernlichts*. Es ermöglicht die dauerhafte Aktivierung des Fernlichts und blendet aktiv vorausfahrende und entgegenkommende Fahrzeuge aus. Bei Scheinwerfern mit einzeln ansteuerbaren Elementen geschieht dies durch Abschaltung oder Dimmung einzelner Lichtpixel. Die Eigenblendung von retroreflektierenden Verkehrszeichen kann durch eine gezielte Helligkeitsreduktion der entsprechenden Lichtpixel erreicht werden.

Die stetige Weiterentwicklung der Scheinwerfertechnologien hin zu hochauflösenden Projektionssystemen ermöglichen nicht nur eine präzi-

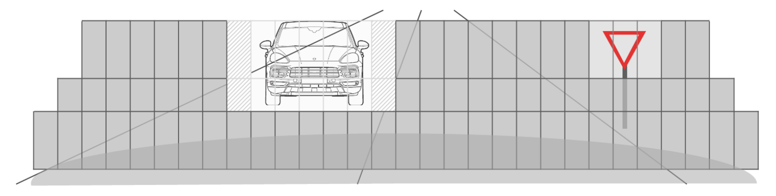


Abbildung 2.7.: Schematische Visualisierung einer Ausblendungssituation mit schraffiert dargestelltem Sicherheitsbereich und gezieltem Dimmen von Pixeln zur Reduktion der Eigenblendung durch Verkehrszeichen. Dargestellt aus Sicht eines 84-Pixel-Matrix-Scheinwerfers mit statischer Vorfeldausleuchtung

sere Ausführung der bereits vorgestellten assistierenden Lichtfunktionen, sondern auch eine Vielzahl neuer Anwendungen.

Neuartige umsetzbare Funktionen sind beispielsweise *Führungslinien* oder *Warnsymbole*, siehe Abbildung 2.8. Führungslinien unterstützen in Baustellen und markieren die Breite des eigenen Fahrzeugs in der Lichtverteilung und helfen dem Fahrer bei der Einschätzung der eigenen Fahrspur [5]. Ebenfalls ist eine Projektion von Warnsymbolen wie Glätte, Abstandsunterschreitung oder Geschwindigkeitswarnung im eigenen Vorfeld möglich. Weitere mögliche Funktionen mit hochauflösenden Scheinwerfersystemen sind Spurwechselassistenten [38], die Kommunikation mit Fußgängern [39], Navigationssymbole oder auch Abstandsmarkierungen zur Unterstützung längsgeregelter Assistenzsysteme.

Assistierende Lichtfunktionen unterliegen, mit Ausnahme der Eigenblendung bei retroreflektierenden Verkehrszeichen, keiner feedbackbasierten Regelung im klassischen Sinne, sondern agieren lediglich als Steuerung auf Fahrzeug- und Umgebungszustände.

Die korrekte Funktionsweise der hier vorgestellten assistierenden Lichtfunktionen hängt im wesentlichen von der Güte des erfassten Umfeldzustands und einer rechtzeitigen und angemessenen Reaktion der relevanten Lichtpixel ab. Ein objektiver Test unter kontrollierbaren Bedingun-

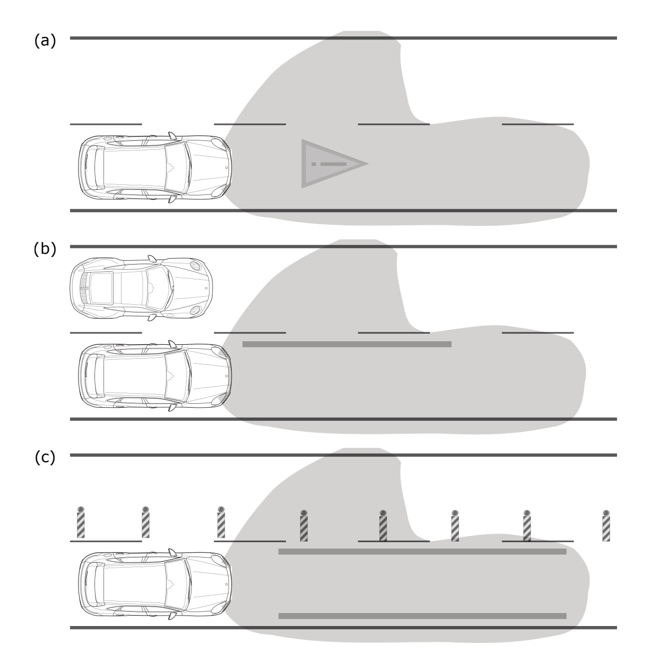


Abbildung 2.8.: Schematische Darstellung von hochauflösenden Lichtfunktionen im Straßenverkehr aus der Vogelperspektive. (a) Warnsymbol: Information für den Fahrer; (b) Spurwechselassistent: warnt vor Verkehrsobjekten im toten Winkel; (c) Baustellenlicht: zeigt die Spurbreite in Engstellen an

gen benötigt somit neben Wissen über den aktuellen Umfeldzustand, auch eine Methode um die geschalteten Lichtpixel mit diesem Umfeldzustand in eine bewertbare Relation zu setzen. Diese Anforderungen motivieren die Entwicklung einer übergeordneten Testmethodik an HiL-Testsystemen in Kapitel 5.

APPLIKATIONSPARAMETER DER LICHTFUNKTION

Assistierende pixelbasierte Lichtfunktionen benötigen neben Sensor- und Fahrzeugeigendaten auch Wissen über die:

- Transformationsgrößen von der Basis der Sensorobjektliste zum Scheinwerferkoordinatensystem
- Abstrahlcharakteristik jedes Lichtpixels
- Parameter, die das Dimmverhalten bei Zustandswechseln, An-/Ausschalt-vorgängen und dynamischem Kurvenlicht beschreiben
- Größe des Sicherheitsbereichs bei Ausblendungen, um Latenzen und Datenlaufzeiten in der Gesamtwirkkette auszugleichen
- Helligkeitsmatrizen, die die Intensitäten der Lichtpixel für alle quasi-statischen Lichtverteilungen wie dem Abblendlicht oder den AFS-Lichtverteilungen vorgeben

Diese Daten werden im Folgenden als *Applikationsparameter* bezeichnet. Sie werden für jedes Fahrzeug- und Scheinwerferprojekt durch Probandenstudien oder durch Expertenbeurteilung unter Laborbedingungen iterativ ermittelt. Die Gesamtheit aller Parameter wird als Datensatz im Steuergerät hinterlegt. Ein geeignetes Testziel für HiL-Testsysteme kann die Überprüfung einer korrekten und reproduzierbaren Anwendung dieser hinterlegten Datensätze sein.

Abbildung 2.9 zeigt die Definition der Koordinatensysteme für das jeweils rechtshändige Welt-, Fahrzeug-, Kamera- und Scheinwerferkoordinatensystem. Die x-Achse ist in Fahrtrichtung positiv und die x-y-Ebene parallel zur Fahrbahnfläche definiert. Der Koordinatenursprung der Kamera liegt im objektseitigen Hauptpunkt der Kameraoptik und das Weltkoordinatensystem dient als feste Bezugsgröße in einer Testszene. Der Koordinatenursprung des Scheinwerferkoordinatensystems wird

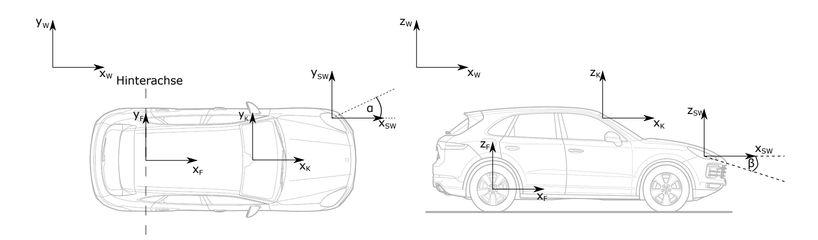


Abbildung 2.9.: Welt- (W), Fahrzeug- (F), Kamera- (K) und Scheinwerfer- (SW) Koordinatensystem, Grafik aus [27]

für pixelbasierte Systeme analog zu [40] als geometrischer Mittelpunkt der Matrix-LED[18]-Optiken festgelegt. Das Fahrzeugkoordinatensystem ist der Bezugspunkt aller über Umfeldsensoren bereitgestellten Objektdaten und ist in dieser Arbeit in der Mitte der Hinterachse definiert.

Die für assistierende Lichtfunktionen essentielle Relativbeziehung zwischen Fahrerassistenzkamera und Scheinwerfer wird in einem Kalibrierschritt in der Fahrzeugproduktion bestimmt [40]. Durch die von SÖHNER [34] vorgestellte Methode zur automatisierten Scheinwerferkalibrierung kann dieser Kalibrierschritt auch online im Fahrbetrieb regelmäßig aktualisiert werden.

2.2.3 PIXELBASIERTE SCHEINWERFERTECHNOLOGIEN

Für die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Lichtfunktionen sind Umsetzungen für pixelbasierte Scheinwerfertechnologien etabliert. Die technische Realisierung unterliegt allerdings zahlreichen Ausprägungen und Freiheitsgraden.

[18] Kurzform für Light-Emitting-Diode (engl.)

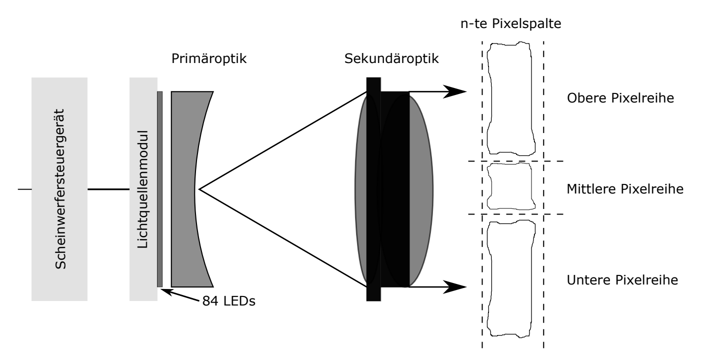


Abbildung 2.10.: Schematischer Aufbau eines 84-Pixel Hauptscheinwerfers mit Scheinwerfersteuergerät, Lichtquellenmodul und optischem System (Primär- + Sekundäroptik), nach [4]

Wie in Abbildung 2.10 am Beispiel eines 84-Pixel-Scheinwerfers dargestellt ist, wird der Scheinwerfer in die folgenden Komponenten untergliedert: das Scheinwerfersteuergerät, die Leuchtquellenmodule und den optischen Systemen zur Projektion der Lichtverteilung in den Straßenverkehr.

In einer zentralen Systemarchitektur lesen Scheinwerfersteuergeräte des linken und rechten Scheinwerfers jeweils die von der Lichtfunktion auf den Fahrzeugbus gelegten Steuersignale und Helligkeitsmatrizen ein und setzen diese in nachgelagerte Lichtquellen und mechatronische Komponenten wie Schrittmotoren um. Als Lichtquellen dienen in pixelbasierten Scheinwerfern überwiegend LEDs. Die erforderlichen Ströme für die Ansteuerung der Lichtquellen werden mit einer Helligkeits-PWM[19]-Korrespondenz ermittelt. Die Umsetzung einer LWR und des dynamischen Kurvenlichts kann in pixelbasierten Scheinwerfern implizit durch eine digitale Verschiebung der Helligkeitsmatrizen oder durch eine entsprechende motorgestützte Drehung des LQMs mit Optik

[19] Kurzform von Pulsweitenmodulation

realisiert sein.

Die Umsetzungszeit der Steuersignale durch den Scheinwerfer kann Schwankungen unterliegen, da Signale vom Scheinwerfersteuergerät sequentiell verarbeitet und die LEDs zur Minimierung von Spannungsspitzen gruppenweise phasenversetzt an- und abgeschaltet werden, vergleiche [41].

Die im Einsatz befindlichen LED-Matrix-Systeme unterscheiden sich vor allem durch die Anzahl an ansteuerbaren Lichtpixeln pro Scheinwerfer und können als einzeiliges oder mehrzeiliges System realisiert sein, vergleiche [40] [4].

Hochauflösende Systeme wie DMD[20] [5], LCD[21] [42] oder μAFS[22] [43] unterscheiden sich vor allem durch ihre maximale Auflösung und den beleuchtbaren maximalen Raumwinkel. Mit DMD stehen in einer Umsetzung beispielsweise 1,3 Millionen Pixel zur Verfügung [5]. Dieses wird in einem 84 Pixel Matrixsystem additiv integriert und ermöglicht kleinere Sicherheitsbereiche in Ausblendsituationen sowie Symbolprojektionen im Vorfeld des Fahrzeuges [5].

Die wesentliche Aufgabe pixelbasierter Scheinwerfer ist die Projektion der in der Lichtfunktion berechneten Helligkeitsmatrizen in den Verkehrsraum. Für den Test der Funktionalität und Korrektheit von Lichtfunktionen innerhalb einer integrierten Wirkkette, stellen daher die Testumgebung und die Bewertungsmethoden die zentrale Fragestellung dar. Im nachfolgenden Kapitel werden bereits publizierte Umsetzungen und Konzepte vorgestellt und evaluiert.

[20] Kurzform von Digital-Micromirror-Device (engl.)
[21] Kurzform von Liquid-Crystal-Display (engl.)
[22] Kurzform von Micro-Structured-Adaptive-Front-Lighting-System (engl.)

KAPITEL 3

BEKANNTE METHODEN FÜR DEN SIMULATIONSBASIERTEN TEST VON LICHTFUNKTIONEN

In automobilen Entwicklungsprozessen sind HiL-Testsysteme, vergleiche Abschnitt 2.1.2, als simulationsbasierte Testmethodik etabliert. In diesem Kapitel werden aktuelle Methoden für Lichtfunktionen aus HiL-, ViL-Testystemen und Fahrsimulatoren vorgestellt und bewertet.

In Abschnitt 3.1 werden zunächst aktuelle Integrations- und Stimulationsmethoden des wesentlichsten Umfeldsensors intelligenter Lichtfunktionen, der Fahrerassistenzkamera, aufgezeigt und analysiert.

Der nachfolgende Abschnitt 3.2 vertieft die Methodik der Anbindung einer vollständigen Kamera an Testsysteme. Dabei werden aktuelle Anforderungen und Ansätze aus der Literatur vorgestellt, um die für Nachtfahrten essentiellen hohen Kontraste auf Monitoren und Leinwänden wiedergeben zu können.

Um reproduzierbare Tests von Lichtfunktionen durchführen zu können, ist eine gesamtheitliche Betrachtung der Testumgebung und Testmethoden notwendig. Abschnitt 3.3 evaluiert in der Literatur angewandte Methoden zur objektiven Bewertung von Lichtfunktion an hardwarebasierten Testsystemen und diskutiert den Stand der Technik aktueller Umsetzungen.

Abschließend werden in Abschnitt 3.4 die Ergebnisse dieses Kapitels zusammengefasst und die abgeleiteten Fragestellungen für die vorliegende Arbeit benannt und eingegrenzt.

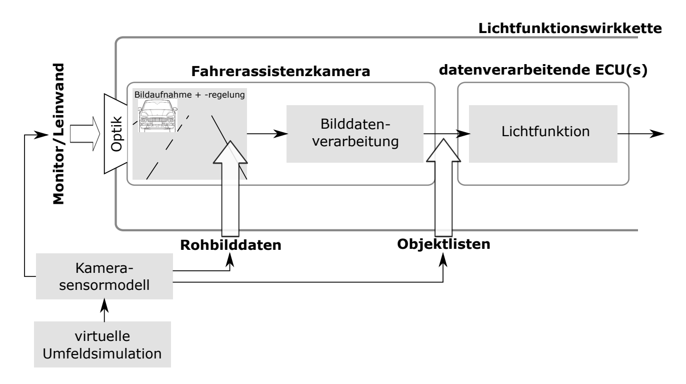


Abbildung 3.1.: Methoden der Dateneinspeisung in die reale Steuergerätewirkkette über ein Kamerasensormodell

3.1 Methoden zur Anbindung und Simulation der Fahrerassistenzkamera

NENTWIG [25] untersucht und zeigt empirisch die prinzipielle Eignung von virtuellen Umfeldsimulationen für eine kamerabasierte Signalverarbeitungskette. In Abbildung 3.1 sind dazu ergänzend aktuell vorherrschende Einspeisemethoden der Fahrerassistenzkamera für HiL-Testsysteme in einer Übersicht dargestellt. Zum Verständnis der logischen Anbindung der virtuellen Umfeldsimulation im Gesamt-Testsystem wird auf Abschnitt 2.1.2 und im speziellen Abbildung 2.2 verwiesen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden diese Methoden erläutert und hinsichtlich der Herausforderungen in der Simulation von Nachtfahrten und möglicher Lösungsansätze diskutiert.

3.1.1 OBJEKTLISTENEINSPEISUNG

Mit einem idealen Kamerasensormodell lassen sich auf Basis der Daten der virtuellen Umfeldsimulation ideale Objektlisten berechnen, die zur direkten Stimulation der Lichtfunktion verwendet werden können. Mit dieser Methodik ist ein deterministisches Kameraverhalten modellierbar. Störende Einflüsse auf den Test der Lichtfunktion, wie Fehlklassifikationen der Bildverarbeitung, können somit vermieden werden.

In dieser Vorgehensweise wird das SuT um die Bilderfassung und Bilddatenverarbeitung reduziert. Zudem kann bei Verortung von Bilddatenverarbeitung und Lichtfunktion auf dem selben Steuergerät, eine Einspeisung von Objektlisten über Debugschnittstellen und Überschreibung steuergeräteinterner Signale erforderlich sein.

3.1.2 DIREKTE BILDDATENEINSPEISUNG

In der direkten Bilddateneinspeisung (DII[1]) wird ein virtuelles Kamerabild in der Umfeldsimulation berechnet. Über ein Sensormodell wird zunächst der optische Pfad über eine Verzerrungsmatrix nachgebildet und die RGB[2]-basierten Bilddaten in das sensorspezifische Bilddatenmodell umgewandelt, vergleiche Abschnitt 2.2.1.

Die in Abbildung 3.2 visualisierte Methode zur Emulation des Bildsensors stellt den aktuellen Stand der Technik dar. Nach GESTER ET AL. [44] ersetzt ein emulierter Bildsensor den realen Bildsensor. Steuersignale des Bildprozessors, wie die Belichtungssteuerung können entsprechend berücksichtigt werden. Sind Umfeldsimulation und Kamerafrequenz

[1] Kurzform von Direct-Image-Injection (engl.)
[2] Kurzform von Rot-Grün-Blau

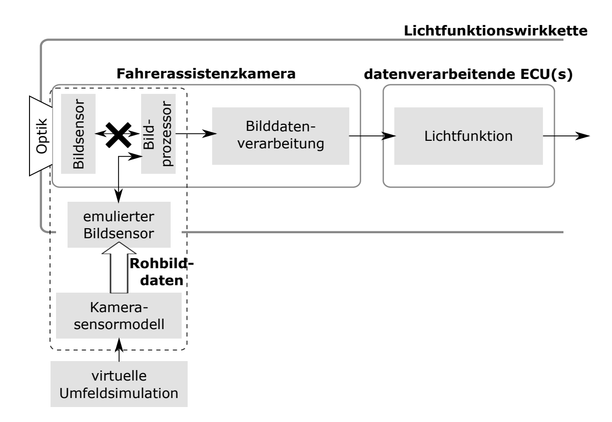


Abbildung 3.2.: Vereinfachte Darstellung der Methode der direkten Bilddateneinspeisung in eine Fahrerassistenzkamera (getrichelt umrandet), vergleiche [2]

nicht synchronisiert, so wird die Einspeisung über Mehrfachpuffer ausgeglichen und Interferenzeffekte werden vermieden. Der optische Pfad der Kamera mit Bildsensor wird in dieser Methode übersprungen.

Die Auflösung und der FOV entspricht dem realen Sichtfeld der Kamera und eine Kalibrierung ist hierbei über virtuell visualisierte Kalibriertafeln möglich. Da Helligkeiten von Scheinwerfern oder Rücklichtern digital vorgegeben werden können, sind die in Nachtfahrten vorkommenden hohen Kontraste darstellbar und der gesamte Dynamikbereich der Kamera kann genutzt werden. Zudem ist eine latenzarme Einspeisung über FPGAs[3] möglich.

Nachteile sind einerseits die initialen Aufwände der Entwicklung eines Sensormodells mit modellierter Verzerrung durch die fehlende Windschutzscheibe und Optik sowie die Nachbildung der spektralen Empfindlichkeit des Bildsensors auf Basis des verwendeten Farbpattern, wie beispielsweise eines RCCC- oder Bayer-Pattern, vergleiche Abschnitt

[3] Kurzform von Field-Programmable-Gate-Array (engl.)

2.2.1. Der Umbau der realen Kamera und die Sensormodellierung erfordert zudem die enge Zusammenarbeit von OEM und Kamerazulieferer.

3.1.3 STIMULATION ÜBER MONITOR ODER LEINWAND

Diese Methode findet in aktuellen Umsetzungen von HiL-, ViL- und Fahrsimulator-Systemen Anwendung, vergleiche Abschnitt 3.3. Die reale Fahrerassistenzkamera ist mit Optik und Windschutzscheibe als Teil des SuT integriert. Über einen Monitor oder Projektionsschirm wird eine virtuelle Testfahrt visualisiert. Die Kamera wird in einer Dunkelkammer betrieben, um in HiL-Anwendungsfällen den Einfluss von Störlicht gering zu halten und den Platzbedarf des Aufbaus zu minimieren. Zudem kann durch die Ergänzung der Kamera um eine vorgeschaltete Korrekturlinse, eine scharfe Abbildung der Darstellung im Bereich zwischen einem und zwei Meter ermöglicht werden. Eine Kalibrierung der Kamera ist über visualisierte Kalibriertafeln in der Umfeldsimulation durchführbar. [25]

Von GESTER ET AL. [44] werden hohe Aufwände für die Kamerakalibrierung und der korrekten Darstellung des FOV genannt. Dies ist für eine geometrisch korrekte Objekterfassung und eventuelle dynamische Kalibrierroutinen der Kamera erforderlich. Nach NENTWIG [25] können in dieser Methode zudem Effekte wie Bewegungsunschärfe und Interferenzen in der Bilderfassung durch unsynchronisierte Wiedergabe- und Aufnahmefrequenz von Kamera und Monitor auftreten. Ebenfalls werden die aktuelle physikalische Limitierung von Monitoren oder Projektoren in der Wiedergabe von hohen Kontrasten sowie darstellbaren minimalen und maximalen Helligkeiten aufgeführt.

Die korrekte Darstellung hoher Kontraste spielt vor allem in Nachtfahrten bei der Klassifikation entgegenkommender Scheinwerfer eine

zentrale Rolle und wird im nachfolgenden Abschnitt 3.2 hinsichtlich der Anforderungen und aktueller Komponsationsmethoden ausführlich evaluiert.

3.1.4 DISKUSSION

In den aufgezeigten Methoden zur Integration der Fahrerassistenzkamera bietet sowohl die Methode der direkten Bilddateneinspeisung als auch die Stimulation über einen Monitor oder Leinwand die Möglichkeit eine möglichst vollständig integrierte Kamera an einem HiL-Testsystem zu betreiben. Die Vorteile der Bilddateneinspeisung überwiegen hinsichtlich des darstellbaren Kontrasts, der Interferenzeffekte bei der Einspeisung und der Einfachheit der geometrischen Kalibrierung, erfordern jedoch hohe initiale Entwicklungs- und Integrationsaufwände. Die Methode der Objektlisteneinspeisung verkürzt das SuT um die Kamera und die Bilddatenverarbeitung und wird im Kontext dieser Arbeit folglich als nicht geeignete Methodik für Systemtests angesehen.

3.2 HERAUSFORDERUNGEN UND METHODEN ZUR REALITÄTSNAHEN DARSTELLUNG VON NACHTFAHRTEN

Teile der nachfolgenden Analyse wurden bereits in [45] und [46] veröffentlicht.

Die Darstellung hoher Leuchtdichten für virtuelle Nachtfahrten stellt aufgrund physikalischer Limitierungen für die Stimulation der Fahrerassistenzkamera mit optischem Pfad eine Herausforderung dar, vergleiche

vorangegangenen Abschnitt 3.1.3. Eine korrekte Wiedergabe von Helligkeiten und Kontraste entgegenkommender Scheinwerfer ist neben dem Anwendungsfall für Fahrerassistenzkameras auch in physiologischen und psychologischen Untersuchungen eine Anforderung an die Simulationsumgebung. Der Großteil der nachfolgend vorgestellten Literatur betrachtet den Anwendungsfall der wahrnehmungsbasierten Untersuchungen, weshalb in dieser Arbeit die Leuchtdichte als Helligkeitsmaß angewandt wird.

3.2.1 KONTRASTE BEI NACHTFAHRTEN

Im Folgenden wird als *statischer Kontrast*[4] der Kontrast K innerhalb eines Bildes und als *dynamischer Kontrast* der Kontrast innerhalb einer Bildfolge bezeichnet. Als Maß für die Darstellungsfähigkeit des Kontrasts von Bildwiedergabegeräten ist der Quotient der Leuchtdichten L_v definiert:

$$K = \frac{L_{v,max}}{L_{v,min}} \tag{3.1}$$

Typische Umfeldleuchtdichten in Nachtfahrten liegen im Bereich zwischen $0,01$ und $10\,\text{cd/m}^2$ [31]. Die Helligkeit entgegenkommender Scheinwerfer erreicht hingegen Werte bis zu $10^5\,\text{cd/m}^2$ [47] woraus innerhalb einer vorherrschenden Szene eine Gesamtdynamikumfang (DR[5])

$$DR = 20 \cdot log_{10}\left(\frac{L_{v,max}}{L_{v,min}}\right) \tag{3.2}$$

von 120 dB abgeleitet werden kann [33] [31]. Werden zusätzlich direkte Blendungen durch falsch eingestellte Scheinwerfer oder Fernlicht mit

[4] In der Literatur ist alternativ auch der Begriff *In-Bild-Kontrast* gebräuchlich
[5] Kurzform von Dynamic-Range (engl.)



Abbildung 3.3.: Das *Vier-Punkt-Licht* des Porsche Panamera (Typ G2) [27]

in Betracht gezogen, sind abgeleitet von einer von KHANH ET AL. [31] benannten maximalen Leuchtdichte einer LED-Scheinwerferlichtquelle mit etwa $20 \cdot 10^6\,\mathrm{cd/m^2}$, maximale Leuchtdichten in einer Größenordnung von bis zu $10^7\,\mathrm{cd/m^2}$ möglich, was einer Dynamik von 180 dB entspricht.

Zusätzlich zur hohen Leuchtdichte stellt auch die Form und Geometrie der Leuchtelemente eines Scheinwerfers eine Herausforderung an die Visualisierung dar. Der Trend zu kleinen Projektionssystemen führt zu größeren Freiheitsgraden in der Gestaltung eines markentypischen Lichtdesigns, wie beispielsweise dem in Abbildung 3.3 dargestellten Porsche *Vier-Punkt-Licht*.

3.2.2 LIMITIERUNG DURCH DARSTELLUNGSSYSTEME

Die im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten maximalen Leuchtdichten und Leuchtdichtekontraste können in Testsystemen mit her-

kömmlicher Projektor- und Displaytechnologie derzeit nicht realitätsnah nachgestellt werden. [46]
Moderne Monitore und Projektionssysteme bieten hohe dynamische Kontraste und hohe Bildauflösungen, sind jedoch durch ungerichtete Streuung von Licht auf den Bildflächen in maximaler Helligkeit und statischem Kontrast stark begrenzt. Typische erreichbare maximale Leuchtdichten liegen bei Projektionssystemen zwischen 100 und 2.000 cd/m^2 [48] und bei leistungsfähigen Monitoren bei 2.000 [49] und 4.000 cd/m^2 [50], wobei zukünftig Leuchtdichten von bis zu 10.000 cd/m^2 [50] erwartet werden können. [46] Mit für den Außeneinsatz konzipierten LED-Videowänden sind ebenfalls Leuchtdichten im Bereich von 6.500 cd/m^2 [51] und 9.000 cd/m^2 [52] erreichbar.
High-End Projektionssysteme wie der *Zeiss Velvet Sim LED* [53] ermöglichen eine hohen statischen Kontrast von bis zu 1 : 2.500.000, der bereits mit $\sim$ 128 dB im Dynamikumfang Nachtfahrten sehr nahe kommt. Die darstellbare maximale Leuchtdichte ist jedoch analog zu den bereits vorgestellten Systemen limitiert.
Methoden zur Kompensation dieser Limitierung, mit dem Ziel einzelne Szenen als realistische Nachtfahrten wieder nachstellen zu können, werden im folgenden vorgestellt.

3.2.3 MODIFIKATIONEN ZUR REALITÄTSNÄHEREN DARSTELLUNG HOHER KONTRASTE

Durch hinzufügen weiterer Lichtquellen werden bestehende Simulatoren so modifiziert, dass erforderliche maximale Leuchtdichten und Kontraste in der Nachtfahrszene erreicht werden.
BOLLING ET AL. [54] untersuchen den Einfluss abgenutzter Windschutzscheiben bei tiefstehender Sonne auf das Fahrerverhalten. Um die erforderliche Blendung zu erreichen, wird eine Halogenlampe vor dem




Abbildung 3.4.: Blendung durch tiefstehende Sonne im Fahrsimulator aus Fahrersicht (links) mit vor dem Fahrsimulatorschirm angebrachter Halogenlampe (rechts) [54][6]

Fahrsimulatorschirm angebracht. Die Helligkeit der Lampe wird dabei manuell so eingestellt, bis sie subjektiv der Blendung einer tiefstehenden Sonne entspricht, siehe Abbildung 3.4.

Eine weitere Simulation von Nachtfahrten wurde von MÜLLER [55] mit Hilfe einer Hochleistungs-LED umgesetzt, um die Beanspruchung des Fahrers in Blendsituationen zu untersuchen. Zusätzlich zu einem projizierten statischen Bild einer Nachtfahrszene wurde ein Leuchtmittel am Schirm angebracht und in verschiedenen zeitlichen Abständen Blendreize zwischen 1.000 und 2.000.000 cd/m^2 induziert.

Um die Blendung durch entegenkommende Fahrzeuge nachzustellen, nutzen FULLERTON ET AL. [58] und HWANG ET AL. [56] [59] eine programmierbare *NSPW500DS* LED-Matrix, die über dem Fahrsimulator angebracht wird. Das Licht der 25x100 einzeln ansteuerbaren LEDs wird mittels eines Strahlteilers (u.a. 42T/58R) mit der Umfeldsimulation zusammengeführt, siehe Abbildung 3.5. Über einen Zuordnungsalgorithmus wird die zum Scheinwerfer korrespondierende LED ermittelt und mit entsprechender Intensität angesteuert.

6 ©Driving Simulation Association

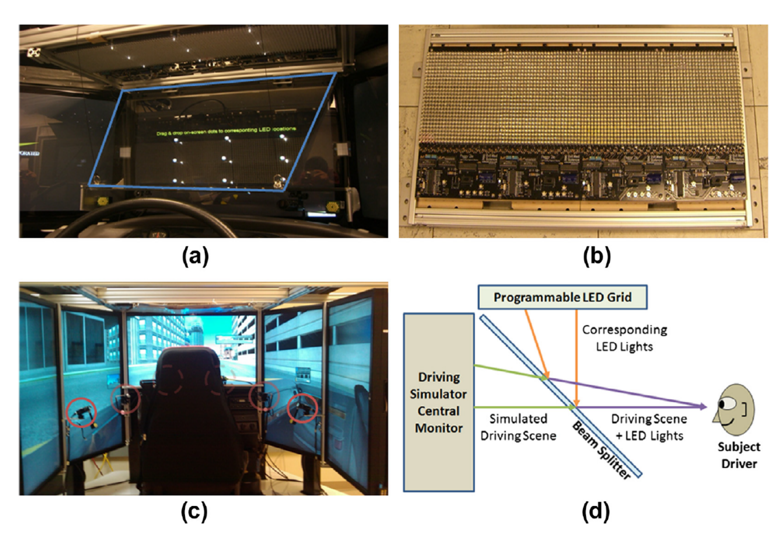


Abbildung 3.5.: Von HWANG ET AL. vorgestellter Fahrsimulator zur realitätsnahen Simulation von Blendung durch entgegenkommende Scheinwerfer, mit (a) Strahlteiler (b) LED-Grid (c) LCD-Monitor und Eye-tracking sowie (d) schematischer Darstellung des Gesamtsystems. Reprinted from [56], Copyright 2013, with permission from Elsevier

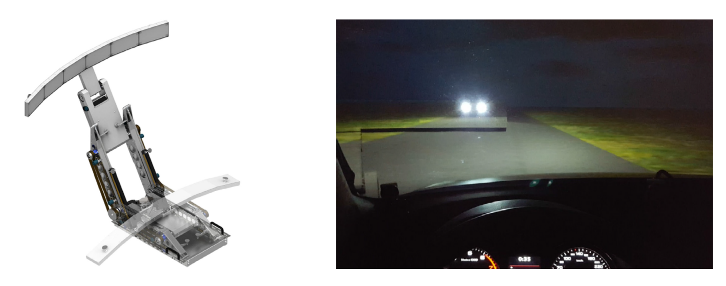


Abbildung 3.6.: Eine Konstruktionsskizze der von HAYCOCK ET AL. vorgestellten bewegbaren Halterung einer LED Matrix (links) und deren Anwendung zur Simulation der Blendung durch ein entgegenkommendes Fahrzeug in einem Fahrsimulator (rechts). Reprinted from [57], Copyright 2017, with permission from Elsevier

Die hierfür verwendeten 42″ LCD-Monitore erreichen Leuchtdichten von bis zu 200 cd/m^2. Die Autoren geben eine maximale Leuchtdichte im Gesamtsystem von über 20.000 cd/m^2 an. [56]

Die derzeit jüngste Umsetzung zur realitätnahen Simulation von Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge in einem Fahrsimulator wird in den Publikationen von HAYCOCK ET AL. [57] [60] aufgezeigt. Das entwickelte Konzept basiert auf sechs nebeneinander angebrachten *P10 LED-Matrix*-Displays mit einer Lichtstärke von jeweils 20 cd pro LED, die einen Pixelabstand von 10 mm zueinander besitzen und mit Hilfe eines Roboterarmes auf einem Fahrsimulatorschirm bewegt werden können. Das Bild der Umfeldsimulation wird durch einen Projektor in Frontprojektion auf die LED Matrix und den kuppelförmigen Fahrsimulatorschirm dargestellt. Die einzeln ansteuerbaren LEDs werden passend zur geforderten Helligkeit und räumlichen Position der virtuellen Scheinwerfer angesteuert, siehe Abbildung 3.6.

Die Autoren geben keine maximale Leuchtdichte in ihrem Versuchsaufbau an. Jedoch kann aus dem Pixelabstand und der maximalen Lichtstärke jeder LED auf eine maximale Leuchtdichte von näherungsweise 200.000 cd/m^2 geschlossen werden.

3.2.4 DISKUSSION

In den vorgestellten Forschungsarbeiten werden in einfachen dynamischen Szenen Leuchtdichten von bis zu 200.000 cd/m^2 erreicht und ermöglichen damit eine für ausgewählte Simualtionsszenen bei Nacht, wie einem entgegenkommenden Fahrzeug mit Abblendlicht, eine plausible maximale Helligkeit. Allerdings führen die aufgezeigten Ansätze auf Basis von zusätzlich integrierten LED-Matrix-Displays zu einigen Nachteilen.

Durch die relativ geringe Distanz von Displays zu Beobachter oder Kamera können benachbarte LEDs als getrennte Lichtquellen aufgelöst werden [57] [60]. Dies kann neben einer verfälschten Darstellung von Scheinwerfern und messbaren Diskretisierungsschritten bei der Simulation von bewegten Scheinwerfern, zu möglichen Fehlklassifikationen als multiple Scheinwerfer in der Fahrerassistenzkamera führen. Leuchtgeometrien und -charakteristika von Scheinwerfern sind mit dieser Methodik nicht korrekt darstellbar.

Die Verwendung von Hochleistungs-LEDs und deren ungerichtete Abstrahlung führt zudem zu einer störenden Aufhellung weiterer Bildbereiche im Simulator und einem Überstrahlen der Umfelddarstellung [57].

Die aufgezeigten Ansätze sind jeweils speziell für einzelne Fahrszenen konzipiert und optimiert. Für eine valide Nachstellung von Nachtfahrten, bei der auch plausible Scheinwerfer-Geometrien, farbige Lichtquellen wie Bremslichter oder retroreflektierende Verkehrszeichen ohne störende Aufhellung des gesamten Simulators dargestellt werden, sind diese Methoden nur eingeschränkt übertragbar. Dies motiviert eine grundlegende Untersuchung neuer Methoden zur effizienten Darstellung hoher Leuchtdichten und Kontraste.

3.3 TESTMETHODEN FÜR INTEGRIERTE LICHTFUNKTIONEN

Nachfolgend werden bekannte Umsetzungen von ViL- und HiL-Testsystemen zur Evaluation und Test von Lichtfunktionen vorgestellt und analysiert. Die jeweils entwickelten Testumgebungen und Ansätze zur objektiven Bewertung werden zudem aufgezeigt und diskutiert. In

Abbildung 3.8 ist eine Übersicht über alle im Folgenden vorgestellten Methoden dargestellt.

3.3.1 Testumgebungen für die Lichtfunktionswirkkette

Klomp et al. [61] und Opfermann et al. [62] präsentieren jeweils eine Methode für adaptive Lichtfunktionen, die den realen Scheinwerfer und das Lichtfunktionssteuergerät an einem HiL-Testsystem integriert. Dazu werden Fahrzeugeigendaten wie Geschwindigkeit, Nick- und Rollwinkel über eine Umfeldsimulation bereitgestellt und über eine Fahrdynamiksimulation eine Bewegungsplattform mit befestigten Scheinwerfern angesteuert. Testfokus sind den Autoren zufolge Lichtfunktionen wie die LWR. Klomp et al. betrachten beispielsweise zusätzlich auch das dynamische Kurvenlicht und die Funktionalität von manuellen Bedienelementen.

Bogdanow et al. [63] stellen ein Verfahren für kamerabasierte Lichtfunktionen vor, bei dem die Fahrerassistenzkamera über reale Leuchtquellen stimuliert wird. Als SuT dient dabei ein Gesamtfahrzeug. Mit einem relativ zum SuT bewegbaren Messwagen und darauf befestigten Scheinwerfern und Heckleuchten können Begegnungssituationen und Folgefahrten nachgestellt werden. Die vorherrschende Umgebungsleuchtdichte innerhalb der Messhalle ist variabel einstellbar.

Eine ViL-Methode unter Nutzung einer LED-Videowand wird von Schonlau et al. [64] und Gerbeth et al. [65] präsentiert. Schonlau et al. stimulieren über einen Spiegel die Fahrerassistenzkamera mittels einer 3 x 10 m großen LED-Videoleinwand und einer vereinfachten Umfeldsimulation, siehe Abbildung 3.7. Weitere Sensor- und Fahrzeugeigendaten werden der Lichtfunktion über Busmanipulationen an entsprechend präparierten Schnittstellen im Fahrzeug zugeführt.

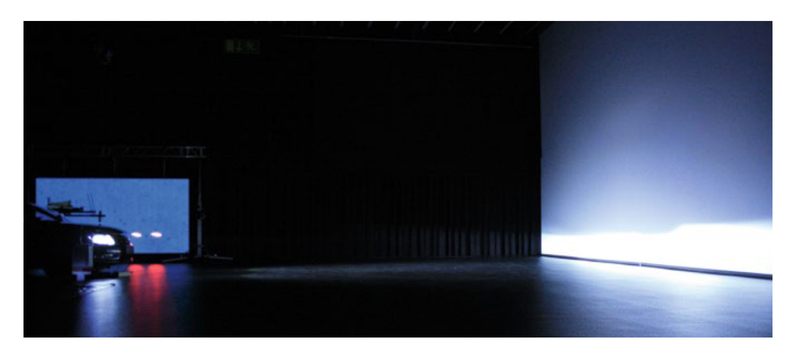


Abbildung 3.7.: Stimulation der Fahrerassistenzkamera in einem ViL-Testsystem über eine LED-Videoleinwand in einer Lichtmesshalle [64]

Eine Umsetzung mit einem Monitor wird durch NENTWIG [25] an einem HiL-Testsystem für allgemeine kamerabasierte Fahrerassistenzsysteme und durch SCHNEIDER ET AL. [66] speziell für Lichtfunktionen vorgestellt. Die Fahrerassistenzkamera ist in einer Dunkelkammer als vollständige Komponente integriert. Fahrzeugeigendaten werden über eine Restbussimulation (RBS) eingespeist. Die weiteren Steuergeräte der Wirkkette sind am HiL-Simulator mit Ausnahme des Scheinwerfers als SuT integriert.

Die Einspeisemethode der Bilddaten vor der Bildverarbeitungseinheit wird durch SCHNEIDER ET AL. [67] angewandt, jedoch nicht im Detail ausgeführt. Fahrzeugeigendaten werden ebenfalls über eine Simulation dem SuT zugeführt.

KLOMP ET AL. [61] und SCHNEIDER ET AL. [67] integrieren die Lichtfunktion ebenfalls mit Steuergerät in eine virtuelle Umgebung. Die Stimulation der Lichtfunktion findet auf Objektlistenebene statt. Fahrzeugeigendaten werden über eine Simulation bereitgestellt.

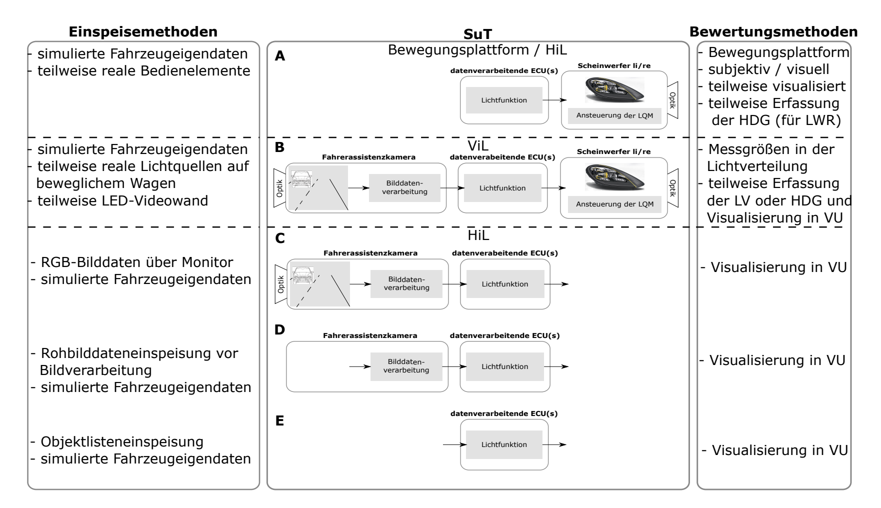


Abbildung 3.8.: Vergleich der in der Literatur vorgestellten Konzepte zur funktionalen Evaluierung von Lichtfunktionen

3.3.2 METHODEN ZUR OBJEKTIVEN BEWERTUNG

Eine detaillierte Darstellung der Bewertungsmethodiken zum Test der Lichtfunktion ist in den vorgestellten Publikationen überwiegend nicht Schwerpunkt der Betrachtungen. Eine Übersicht über die Literatur wird zusammen mit den Stimulationsmethoden in Abbildung 3.8 aufgezeigt. Vorgestellte Bewertungsmethoden der Lichtfunktion sind:

- Die visuelle Bewertung der Reaktion der Lichtfunktion anhand aktueller Lichtverteilung in einer Lichtmesshalle analog zur Erprobungsfahrt [61]
- Die Bewertung anhand der Darstellung in einer virtuellen Umfeldsimulation als simulierte Lichtverteilung, als transparente Kegel, messtechnisch erfasste HDG oder Gesamtlichtverteilung [67] [61] [64] [68]

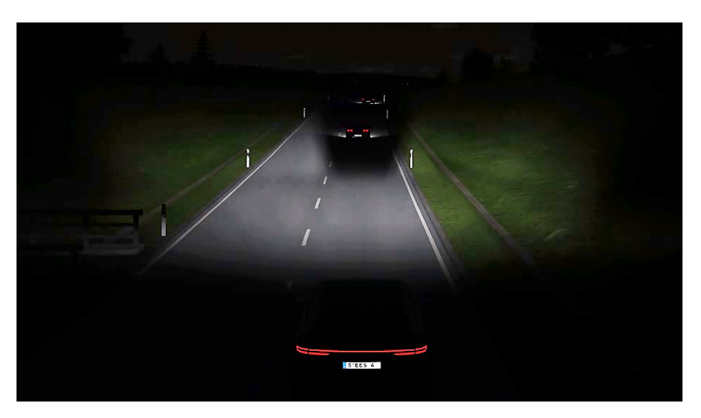


Abbildung 3.9.: Visualisierung einer Ausblendsituation mit einem 84-Pixel Matrix-Beam-Scheinwerfersystem eines Porsche Cayenne (Typ E3) mit dem Light-Source-Combiner in der Umfeldsimulation VTD

- Bewertung anhand einer sensorbasierten Erfassung der HDG des Scheinwerfers oder weiterer Messpunkte in der Lichtverteilung [63] [62]

Die sensorbasierte Erfassung der HDG oder weiterer Messgrößen der realen Lichtverteilungen findet ausschließlich in Lichtmesshallen an ViL-Testsystemen statt, da entsprechend Platz vorgehalten werden muss. An HiL-Testsystemen ist hingegen die Bewertung anhand der Visualisierung vorherrschend.

Werkzeuge wie *VTD* oder *CarMaker* bieten Visualisierungsmöglichkeiten auf Basis goniophotometrisch vermessener Scheinwerferlichtverteilungen an. Für jedes schaltbare Element kann eine Abstrahlcharakteristik hinterlegt werden, die mit den Helligkeitswerten der Lichtfunktion multipliziert und als eine Gesamtlichtverteilung schließlich visualisiert wird, vergleiche Abbildung 3.9.

Für eine funktionale Darstellung und Erlebbarkeit der Lichtfunktionen ist dies ausreichend und wird für die Evaluierung neuer Funktionen produktiv genutzt. KRAHNSTÖVER ET AL. [69] evaluiert beispielsweise an

einem Fahrsimulator mit VTD in einer Probandenstudie die Auswirkung neuer Lichtfunktionen auf das Fahrerverhalten.

WALDNER ET AL. [68] präsentieren eine Methode zur Evaluierung der Qualität der umgesetzten Lichtverteilung realer Scheinwerfer. Dabei wird die echte Lichtverteilung kamerabasiert erfasst und in einer virtuellen Umfeldsimulation dargestellt. Mit Hilfe dieser Methodik können beispielweise Linsendefekte und daraus folgende Inhomogenitäten der Lichtverteilung in eine virtuelle Umgebung übertragen werden.

Um echtzeitfähige Lichtsimulationen zu ermöglichen werden virtuelle Lichtverteilungen mit Shader-Methoden visualisiert und führen zu einer Aufhellung auf entsprechend projizierte Texturen, vergleiche [68] [70] [71]. Größtenteils werden für die resultierenden Helligkeiten vereinfachte Beleuchtungsmodelle wie das *Phong-Modell* [72] eingesetzt. Auf globale Raytracing-Algorithmen und komplexe Materialdatenbanken wird zugunsten der Echtzeitfähigkeit verzichtet.

3.3.3 DISKUSSION

Im folgenden Abschnitt wird eine Anforderungsliste abgeleitet und die vorgestellten Konzepte und Methoden anhand dieser diskutiert, um so eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit und Limitierung der vorgestellten Umsetzungen zu ermöglichen. In Tabelle 3.1 werden die erörterten Anforderungen dargestellt und mit den Konzepten aus Abbildung 3.8 in Relation gesetzt.

Hinsichtlich stetig wiederkehrender Regressionstests, der Bewertung in Abhängigkeit verschiedener Hardware-Architekturen und daraus abgeleitete Vielzahl aufzubauender oder umzurüstender Fahrzeugderivate oder dem Test länderabhängiger Varianten wie Rechts-/Linksverkehr,

Tabelle 3.1.: Erfüllungsgrad der Anforderungen zu Integration und Testmethodik pixelbasierter Lichtfunktionen der bereits vorgestellten zusammengefassten Konzepte A-E in Abbildung 3.8

	vorgestellte Konzepte				
	A	**B**	**C**	**D**	**E**
(1) Platzbedarf im HiL-Labor	-	-	o	+	+
(2) Integrationsmethode der Kamera	-	+	+	+	o
(3) Fahrzeugeigendaten	+	+	+	+	+
(4) Datenbasis für Bewertung	o	o	+	+	+
(5) Virtuelles Umfeld	-	+	+	+	+
(6) Bewertungsmethode für adaptive Lichtfunktionen	o	o	o	o	o
(7) Synchronisation von VU und Helligkeitsmatrix	-	-	-	-	-
(8) Bewertungsmethode für kamerabasierte Lichtfunktionen	-	o	-	-	-

wird die regelmäßige Verifikation durch die HiL-Methodik gegenüber der vorgestellten ViL-Methodik als zielführender betrachtet.

(1) ViL-Testumgebungen haben zudem durch die realen Scheinwerfer und Monitore für die Kamerastimulation und dem benötigten Freiraum zur Auswertung von realen Lichtverteilungen auf Messwänden einen hohen Platzbedarf. HiL-Testumgebungen nutzen überwiegend platzsparende Bilddaten- oder Objektlisteneinspeisung. Der zugrundeliegende Zielkonflikt ist einerseits das Bestreben einer möglichst vollständigen Ende-zu-Ende Integration der Wirkkette der Lichtfunktion. Unter der Annahme von valider Systemstimulation kann daraus eine hohe Verhaltensvalidität abgeleitet werden. Eine Reduktion des SuT auf die wesentlichen und für die Testaussagen notwendige Komponenten minimiert hingegen die Aufwände.

(2) Für die Fahrerassistenzkamera wird die Bilddateneinspeisung und die Stimulation über ein Bildwiedergabegerät als geeignete Einspeisung betrachtet, vergleiche Abschnitt 3.1. Die im Stand der Technik vorherrschende Anbindung der realen Kamera findet in den vorgestellten Methoden über Monitore statt. Von den beschriebenen Herausforderungen

ist vor allem für die Simulation entgegenkommender Scheinwerfer die physikalische Limitierung von maximal darstellbarer Helligkeit und Kontrast von Bildwiedergabemedien als kritisch zu bewerten, vergleiche Abschnitt 3.2.2.

(3) Fahrzeugeigendaten und Fahrdynamik sind für adaptive und assistierende Lichtfunktion essentiell, vergleiche Abschnitt 2.2. In den vorgestellten Konzepten werden in ViL und HiL diese Daten überwiegend simuliert und über Restbussimulationen bereitgestellt.

(4) Für eine reproduzierbare Bewertung der Lichtfunktion kann, analog zur subjektiven Absicherung von Lichtfunktionen auf Erprobungsfahrten, eine rein visuelle Evaluierung als nicht objektiv angenommen werden. Zusätzlich erschweren die nach heutigem Stand der Technik vorherrschenden Vereinfachungen der Lichtfunktionsvisualisierung und die unberücksichtigte Umsetzungszeit des entfallenen realen Scheinwerfers die Bewertung. Letzteres führt zu einer invaliden Zuordnung von Umfeldsimulationszustand und Lichtverteilungsvisualisierung in einem gemeinsamen Bild. Bei der Evaluierung von zeitkritischen Funktionen, wie beispielsweise der Ausblendungsfunktion, können folglich keine belastbaren Aussagen getroffen werden.

Die Erfassung der HDG des echten Scheinwerwerfers und die anschließende Visualisierung in einer Umfeldsimulation, wie durch SCHONLAU ET AL. [64] vorgestellt, ermöglicht den Abgleich von virtueller Szene mit der aktuellen HDG des Scheinwerfers in einem Ende-zu-Ende-Ansatz. Die Überstrahlung von linken und rechten Scheinwerfer auf einer Messwand kann jedoch, neben der Herausforderung der Detektion der korrekten HDG, vergleiche [34], zu Einschränkungen in der Bewertung führen. Ein Rückschluss auf die exakten Dimmwerte einzelner Lichtpixel und damit dem Test von beispielsweise Eigenblendungsfunktionen oder korrekt umgesetzter Applikationsparameter kann, aufgrund der üblichen Überlappung der Abstrahlcharakteristik benachbarter Lichtpixel,

in dieser Methode nur erschwert sichergestellt werden. Eine Bewertung auf Basis von Helligkeitsmatrizen wird für den funktionalen Test als objektiver und folglich geeigneter betrachtet.

(5) Für die Stimulation der Kamera über Sensormodelle, die Darstellung von Verkehrsobjekten und der virtuellen Fahrt auf OpenDrive-Strecken ist eine virtuelle Umfeldsimulation erforderlich. Weitere Eingänge in die Lichtfunktion wie Fahrdynamikdaten oder der Lenkwinkel werden an das virtuelle Umfeld gesendet und ermöglichen ein plausibel und zu den Bewegungsdaten eingespeistes Kamerabild. Für den Test von assistierenden Lichtfunktionen sind die Daten der virtuellen Umfeldsimulation eine objektive Referenz. In den vorgestellten Konzepten kommt überwiegend eine VU zum Einsatz.

(6) Objektive und reproduzierbare Bewertungsmethoden zum Test von statischen Lichtverteilungen, dem Wechsel zwischen statischen Lichtverteilungen, sowie der Bewertung von LWR und dynamischen Kurvenlicht sind essentiell. In den vorgestellten Publikationen liegen alle Daten für die Stimulation und Bewertung adaptiver Lichtfunktionen vor, vergleiche Abschnitt 2.2.2. Bewertungsansätze für adaptive Lichtfunktionen werden teilweise aufgeführt, jedoch überwiegend auf Grundlage einer realen Scheinwerferlichtverteilung oder einer Visualisierung.

(7) Um gültige Aussagen für assistierenden Lichtfunktionen treffen zu können ist eine Methodik notwendig, um Bussignale und Daten der virtuellen Umfeldsimulation zu synchronisieren. Dieser Aspekt wird in der diskutierten Literatur nicht berücksichtigt und dargelegt.

(8) Schließlich kann auf Grundlage einer Synchronisationsmethode eine Bewertungsmetrik für zeitkritische kamerabasierte Funktionsanteile wie die Ausblendungsfunktion abgeleitet werden. Bestehende Methoden nutzen dafür überwiegend reale Scheinwerfer in ViL-Methoden oder Visualisierungen, verzichten aber auf die Nutzung einer vorherigen Synchronisation der Daten.

3.4 ZUSAMMENFASSUNG UND ABGRENZUNG EIGENER UNTERSUCHUNGEN

In diesem Abschnitt wird das Ergebnis der Analyse des aktuellen Standes der Technik zum simulationsbasierten Test von Lichtfunktionen zusammengefasst sowie Herausforderungen abgeleitet und die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit eingegrenzt.

In Abschnitt 3.1 wurden aktuelle Methoden zur Integration und Simulation von Fahrerassistenzkameras vorgestellt und hinsichtlich der Eignung für die Simulation von Nachtfahrten bewertet. Die Vorteile der direkten Bilddateneinspeisung überwiegen im aktuellen Stand der Technik hinsichtlich des darstellbaren Kontrasts, der vermeidbaren Interferenzeffekte und der Einfachheit der geometrischen Kalibrierung. Dem entgegen stehen jedoch hohe initiale Entwicklungs- und Integrationsaufwände. Die Stimulation der Fahrerassistenzkamera über Darstellungssysteme unterliegt hinsichtlich Nachtfahrten Herausforderungen in der Bildsynchronisation, Kontrast und maximaler Helligkeit.

In Abschnitt 3.2 wurden aktuelle Methoden zur Kompensation der Limitierungen in der Darstellung hoher Kontraste über Monitore oder Leinwände analysiert. Konzepte der Literatur basieren größtenteils auf der Verwendung von zusätzlichen LEDs, um die Helligkeit entgegenkommender Scheinwerfer in Simulatoren realitätsnah darzustellen. Gemeinsame Nachteile der vorgestellten Methoden sind hierbei die wahrnehmbare Diskretisierung bei Bewegungssimulation, die Wahrnehmung multipler Leuchtquellen bei geringen Simulatordistanzen und die störende Aufhellung weiterer Simulatorbereiche durch die ungerichtete Abstrahlung der Leuchtquellen.

In Abschnitt 3.3 wurden publizierte Konzepte für den funktionalen Test von integrierten Lichtfunktionen an HiL- und ViL-Testsystemen hinsichtlich der Testumgebung und der Bewertungsmethodik betrachtet.

Während für die Kamerastimulation sowohl Bildwiedergabemedien als auch Bilddateneinspeisung zum Einsatz kommen, basiert die Bewertung der Lichtfunktion vorwiegend auf subjektiven oder darstellungsbasierten Vorgehensweisen in einem virtuellen Umfeld. Objektivierende Metriken oder Synchronisationsmechanismen, vergleiche Abschnitt 5.2, werden nicht benannt. Bestehende ViL-Testsysteme nutzen den realen Scheinwerfer und die kamerabasiert erfasste HDG als Grundlage für die Evaluation. Für diese Methodik können Einschränkungen hinsichtlich Platzbedarf, Genauigkeit der erfassten HDG und Einschränkungen in der Bewertung korrekter Applikations- und Dimmwerte abgleitet werden.

Um reproduzierbare Tests mit einer vollständig integrierten Fahrerassistenzkamera durchführen zu können sind neue Ansätze zur Darstellung hoher Kontraste notwendig. Im ersten Schwerpunkt dieser Arbeit wird in *Kapitel 4* eine neue Methodik zur effizienten Darstellung hoher Kontraste vorgestellt. Das entwickelte Konzept basiert dabei auf einem zusätzlichen Projektor der dem Simulationssystem hinzugefügt wird, vergleiche [73] [74]. Realisierungsmöglichkeiten werden dabei erarbeitet und konzeptionell evaluiert. Die prototypische Umsetzung des vielversprechenden Ansatzes wird zudem hinsichtlich des Standes der Technik evaluiert.

Für den Test der integrierten Lichtfunktion ist eine gesamtheitliche Betrachtung von Testumgebung und Bewertungsmethodik notwendig. Die Evaluation pixelbasierter Lichtfunktionen, der valide Test von zeitkritischen Funktionsanteilen wie der Ausblendungsfunktion und die Integration objektiver Bewertungsmetriken stehen nicht im Fokus bereits publizierter Umsetzungen. In *Kapitel 5* dieser Arbeit wird eine Testumgebung für pixelbasierte Lichtfunktionen entwickelt und objektive Bewertungsmethoden für pixelbasierte Lichtfunktionen abgeleitet, die auch zeitkritische Bewertungen ermöglicht. Das entwickelte Konzept

wird schließlich anhand einer seriennahen Lichtfunktion prototypisch umgesetzt, untersucht und gegenüber dem Stand der Technik diskutiert.

In der vorliegenden Dissertation werden somit Methoden entwickelt und evaluiert, die zwei wesentliche aktuelle Herausforderungen in der simulationsbasierten Evaluierung von Lichtfunktionen an HiL-Testsystemen fokussieren:

- Die Darstellung hoher Kontraste zur Stimulation von Fahrerassistenzkameras in virtuellen Nachtfahrten.
- Die gesamtheitliche Betrachtung von Testumgebung und Testmethodik zur objektiven Bewertung pixelbasierter Lichtfunktionen.

Kapitel 4

Darstellung hoher Kontraste

Im nachfolgenden Kapitel dieser Arbeit werden zwei projektorbasierte Ansätze evaluiert, die auf Basis einer effizienten Lichtnutzung die Darstellung hoher Leuchtdichtekontraste in virtuellen Nachtfahrten an Testsystemen mit realer Fahrerassistenzkamera ermöglichen. Grundlage dieses Kapitels bildet die Untersuchung des aktuellen Standes der Technik und die Analyse der Herausforderungen in der Bildwiedergabe von Nachtfahrten in Abschnitt 3.2.

Zunächst wird in Abschnitt 4.1 das zugrunde liegende projektorbasierte Konzept vorgestellt und anschließend zwei daraus abgeleitete mögliche Realisierungen konzeptionell evaluiert. Die Erste basiert auf der Nutzung von Retroreflexstoffen und die Zweite auf der Nutzung von holographischen Diffusoren. Im Anschluss wird der Ansatz mit holographischem Diffusor prototypisch umgesetzt und mit dem Versuchsaufbau eine statische Nachtfahrszene nachgestellt, Abschnitt 4.2. Schließlich erfolgt die Diskussion der experimentellen Ergebnisse in Abschnitt 4.3.

Teile der nachfolgenden Untersuchungen wurden vom Autor bereits in [45] und [46] sowie in den Patentschriften [73] und [74] veröffentlicht. Einzelne Abschnitte sind im Folgenden wörtlich aus den englischsprachigen Veröffentlichungen übersetzt.

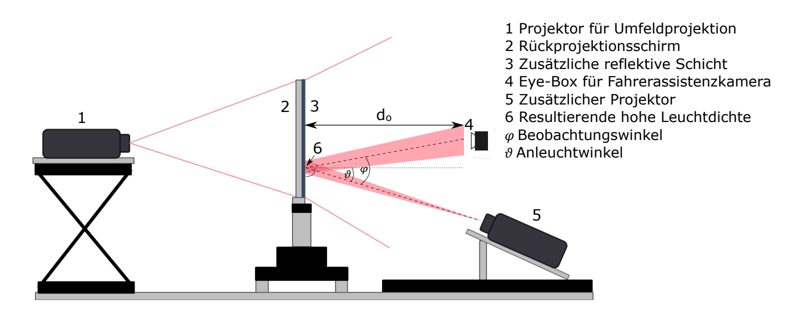


Abbildung 4.1.: Konzept zur Dartellung hoher Leuchtdichtekontraste mit Hilfe eines zweiten Projektors und einer reflektierenden Schicht, nach [46]

4.1 KONZEPTIONELLE BETRACHTUNG

4.1.1 EFFIZIENTE LICHTNUTZUNG DURCH EINE REFLEKTIERENDE SCHICHT

Wie in Abschnitt 3.2 aufgezeigt wurde, ist es mit derzeitiger Projektor- und Displaytechnologie nicht möglich, die hohen Leuchtdichtekontraste in virtuellen Nachtfahrten realitätsnah wiederzugeben. Bestehende Systeme des Standes der Technik, die vor allem zur Nachstellung von Blendsituationen und Probandenstudien verwendet werden, nutzen zusätzliche Lichtquellen wie beispielsweise leistungsstarke LEDs. Nachteile dieser Ansätze sind die ungerichtete Abstrahlcharakteristik und die resultierende Aufhellung weiterer Simulatorbereiche, die geringe erreichbare Auflösung zur Nachstellung von Leuchtquellengeometrien und die fehlende Farbdarstellung.

Abbildung 4.1 illustriert das zugrundeliegende Konzept dieser Arbeit. Dieses basiert auf der Nutzung eines Rückprojektionssystems für die Darstellung des virtuellen Umfelds und eines zusätzlichen Projektors in Frontprojektion. Dieser fügt ausschließlich an Stellen benötigter hoher Leuchtdichte gezielt Licht in die Fahrszene hinzu. Mit Hilfe einer

einseitig reflektierenden Schicht wird dieses Licht effizient zur Fahrerassistenzkamera zurückgeworfen. Um störende Parallaxe-Effekte und unterschiedliche Schärfeebenen zu vermeiden, werden die Bildebenen von Rück- und Frontprojektion aufeinander gelegt. [45] [46]

4.1.2 VERWENDUNG VON RETROREFLEXSTOFFEN

Eine effiziente und gezielte Reflexion ist beispielsweise mit der Nutzung von retroreflektierenden Materialien möglich. Die Idee des Ansatzes ist es, retroreflektierende Partikel, wie beispielsweise auf der Basis von halbverspiegelten Glaskugeln, zufällig über die Simulatorschirmfläche verteilt mit einer festzulegenden Dichte ρ_R aufzubringen [45] [46] [73].

Aus dem zusätzlich aufgebrachten Licht des Projektors in Frontprojektion resultieren die erforderlichen hohen Leuchtdichten der virtuellen Fahrszene. Eine mögliche Abschätzung der maximalen Leuchtdichte L_v ermöglicht die folgende Gleichung 4.1, wobei ϑ der Anleuchtwinkel und $E_{v,\perp}$ die zum Simulatorschirm orthogonal bestimmte Beleuchtungsstärke ist. Der Winkel φ stellt den Beobachtungswinkel[1] dar, der als Winkel zwischen Fahrerassistenzkamera und Projektor definiert ist. ρ_R stellt die faktorielle Auswirkung der aufgebrachten Dichte der retroreflektierenden Partikel dar und R_A ist der zugehörige materialspezifische Reflexionskoeffizient. [45] [46]

$$L_v = \rho_R \cdot R_A\left(\varphi, \vartheta\right) \cdot \frac{E_{v,\perp}}{\cos\left(\vartheta\right)} \tag{4.1}$$

Um Leuchtdichten von bis zu 100.000 $\mathrm{cd/m^2}$ erreichen zu können, ist bei einer beispielhaft gewählten Beleuchtungsstärke von 5.000 lx, einer

[1] Die in der Literatur übliche Notation für den Beobachtungswinkel ist α. In dieser Arbeit wird, um Doppelbelegungen zu vermeiden, φ verwendet.

Tabelle 4.1.: Anforderungen an Koeffizienten R_A der Klasse RA2 in cd/lx/m^2 nach DIN 67520 [75] [46]

Beobachtungswinkel φ	**Anleuchtwinkel** ϑ		
	$5\,^\circ$	$30\,^\circ$	$40\,^\circ$
$0,2\,^\circ$	250	150	110
$0,33\,^\circ$	180	100	95
$2\,^\circ$	5	2,5	1,5

Auswirkung der Partikeldichte von $\rho_R = 0,1$ und einer angenommenen senkrechten Projektion auf den Simulatorschirm für $\vartheta \approx 90\,^\circ$, mindestens ein Reflexionskoeffizient R_A von $200\,\text{cd/lx/m}^2$ notwendig. [45] [46]

Bei kommerziell erhältlichen retroreflektierenden Materialien, wie beispielsweise der *Oralite® 5810 High Intensity Grade* [76], ist dieser Koeffizient auf Basis der DIN[2] 67520 [75] für die Anwendung im Straßenverkehr ausgelegt und lediglich für Beobachtungswinkel $\varphi < 1^\circ$ effizient, vergleiche Tabelle 4.1. [45] [46]

Die erforderlichen kleinen Beobachtungswinkel führen bei angenommenen Distanzen in Simulatoren von $1\,\text{m} < d_o < 5\,\text{m}$ zu notwendigerweise kleinen Distanzen zwischen Kamera und Projektor. Abbildung 4.2 veranschaulicht die relative Entfernung d_r des virtuellen Brennpunktes des Projektors zum virtuellen Brennpunkt der Fahrerassistenzkamera über ihren gemeinsamen Abstand zum Simulatorschirm d_o für $\varphi = 0,2\,^\circ, \varphi = 0,33\,^\circ$ und $\varphi = 1\,^\circ$. Die resultierenden relativen Abstände nehmen mit dem Abstand zum Simulatorschirm linear zu. Die notwendigen $d_r < 0{,}03\,\text{m}$ für $d_o < 5\,\text{m}$ sind nicht realisierbar (weitere Annahmen: die optischen Achse der Kamera ist orthogonal zum

[2] Kurzform von Deutsches Institut für Normung

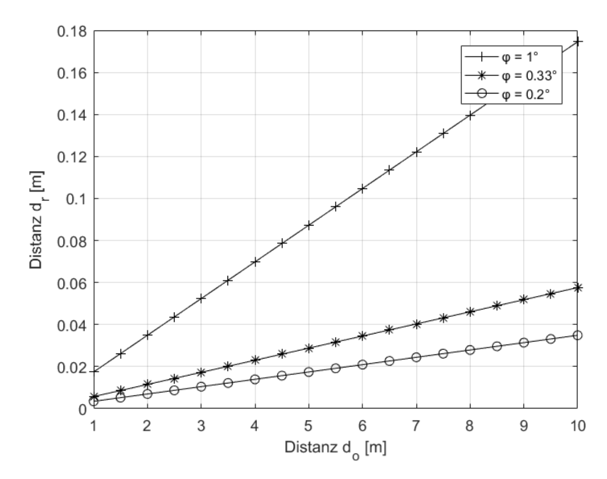


Abbildung 4.2.: Zusammenhang zwischen dem relativen Abstand von Projektor und Fahrerassistenzkamera (d_r) und ihrem gemeinsamen Abstand zur Leinwand (d_o), um den angegebenen Beobachtungswinkel zu erhalten [46]

Simulator ausgerichtet; Betrachtung der Bildmitte). [45] [46]

Die aufgezeigte starken Sensitivität von R_A gegenüber kleinen Änderungen des Beobachtungswinkels bedeutet zudem eine hohe Abhängigkeit der resultierenden Leuchtdichte von kleinen Veränderungen in der Relativposition von Kamera und Projektor insbesondere bei geringen Abständen zum Simulatorbildschirm. Durch diese Sensitivität ist die Auslegung einer Eye-Box, die gleichmäßige Helligkeiten und ein vollständiges Bild in einem definierten Bereich sicher stellt, nicht umsetzbar. Dieser Effekt muss in der Umsetzung durch eine regelmäßige photometrische Kalibrierung oder eine fixierte Kameraposition kompensiert werden. [45] [46]

Neben weiteren kompensierenden Methoden, wie der Vergrößerung des Abstands von Kamera und Projektor d_r mit beispielsweise Spiegeln, müsste die Kamera-Simulatordistanz d_0 entsprechend vergrößert wer-

den, was einen Einsatz dieses Konzepts in den angenommenen Dimensionen stark einschränkt. Eine weitere Möglichkeit ist die Optimierung des Reflexionsvermögens der retroreflektiven Partikeln hin zu größeren Winkeln. Diese Möglichkeiten der Modifikation werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet. [45] [46]

Schließlich müssen die retroreflektierenden Partikel so gestaltet sein, dass eine Lichtbrechung oder -streuung an diesen Elementen und einer daraus resultierende Bildstörung durch die vorgesehene Rückprojektion mit beispielsweise einer partiell lichtundurchlässigen Schicht vermieden wird. Als Folge der Lichtundurchlässigkeit an Stellen der retroreflektierender Partikel müssen die daraus folgenden Auswirkungen auf die Homogenität und die darstellbare Bildauflösung des Simulators minimiert werden. Folglich sind diese Partikel entsprechend klein zu wählen und müssen zudem in ihrer Dichte, mit der diese auf dem Simulatorschirm aufgebracht werden, stark beschränkt werden. [45] [46]

Auch der Projektor in Frontprojektion muss aufgrund der hohen Effizienz der Retroreflexion im Schwarzwert und im darstellbaren statischen Kontrast hohen Anforderungen genügen, um so eine unbeabsichtigte Aufhellung weiterer Bereiche des Simulatorschirms zu vermeiden. [45] [46]

Die aufgezeigten Herausforderungen bezüglich der Realisierung mit Retroreflexstoffen, vor allem hinsichtlich des notwendigen kleinen Beobachtungswinkels, führen im Rahmen dieser Arbeit zur Weiterentwicklung des Gesamtkonzepts hin zur Nutzung von holographischen Diffusoren, siehe Abschnitt 4.1.3. [45] [46]

4.1.3 VERWENDUNG VON HOLOGRAPHISCHEN DIFFUSOREN

Holographisch-optische Elemente (HOE) ermöglichen die Abbildung optischer Funktionen wie beispielsweise Linsen oder Reflexionscha-

rakteristiken in speziellen Photopolymeren [77]. Holographische Diffusoren stellen dabei eine holographische Aufnahme einer diffus streuenden Oberfläche dar. Durch die hohe Transparenz und die effiziente wellenlängen- und winkelspezifische Rückstrahlcharakteristik bieten sie im Vergleich zu dem in Abschnitt 4.1 diskutierten Ansatz deutliche konzeptionelle Vorteile. [45] [46] [74]

Die Herstellung kann durch eine pixelweise optimierte Belichtung mit synchronisiertem und monochromatischem Objekt- und Referenzstrahl erfolgen [78]. Die Reflexionscharakteristik von holographischen Diffusoren wird dabei im Aufnahmeschritt für eine effiziente und winkelspezifische Strahlführung optimiert [77]. Die Größe und Position einer Eye-Box wird durch im Belichtungsverfahren definiert und ergibt sich implizit aus der Überlagerung der Raumwinkel aller Reflexionen. [45] [46]

Hologramme sind wellenlängenspezifisch und wirksam für passendes monochromatisches Licht. Mit monochromatischen Diffusoren sind nach PIAO ET AL. [79] Effizienzen von über 90 % erreichbar. Die in [79] vorgestellte Belichtungsmethode ermöglicht zudem die Herstellung holographischer Diffusoren mit Empfindlichkeiten für bis zu drei ausgewählte Wellenlängen, wie beispielsweise Rot, Grün und Blau. Mit dem passenden monochromatischen Licht sind Beugungseffizienzen von über 40 % realisierbar. Folglich ist die Darstellung von weißen und farbigen Bildelementen auf einem holographischen Diffusor möglich. Für eine detailierte Beschreibung zur Herstellung und Funktionsweise von HOEs wird auf die entsprechende Literatur [77] [78] [79] verwiesen. [45] [46]

Die wellenlängenspezifische Beugungseffizienz stellt hohe Anforderungen an das Spektrum $\Phi_{el}(\lambda)$ des zugehörigen Projektors. Die resultierende Leuchtdichte kann mit der nachfolgenden Gleichung abgeschätzt werden, wobei die Beugungseffizienz als $\eta\,(\lambda)$, die wirksamen Fläche als A_H und deren geometrische Orientierung als ϵ_H, die Hellempfindlichkeitskurve als $V\,(\lambda)$, sowie das photometrischen Strahlungsäquivalents

als K_m und die Größe der Eye-Box implizit im Raumwinkel Ω der Reflexionen definiert ist. [45] [46]

$$L_v = \frac{K_m \cdot \int_{380\,\mathrm{nm}}^{780\,\mathrm{nm}} \Phi_{el}(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot V(\lambda)\, d\lambda}{A_H \cdot \Omega \cdot \cos(\epsilon_H)} \tag{4.2}$$

Mit einer angenommenen Eye-Box von 120 mm x 60 mm bei 1 m Abstand (implizit $\Omega = 0.0070\,\mathrm{sr}$) und einer angenommenen Effizienz, bei der etwa 20 % der Beleuchtungsstärke von 5.000 lx genutzt wird, können Leuchtdichten von etwa 100.000 $\mathrm{cd/m^2}$ abgeschätzt werden. [45] [46]

Dieses Konzept wird im Folgenden prototypisch umgesetzt und experimentell evaluiert.

4.2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN MIT HOLOGRAPHISCHEM DIFFUSOR

Aktuell erfordert die Herstellung holographischer Diffusoren hohe initiale Aufwände und unterliegt zudem Einschränkungen in der herstellbaren maximalen Fläche.

Ziel ist es mit einem vorliegenden Prototypen eines RGB-Diffusors, vergleiche Anhang A.2.6, eine simulierte statische Nachtfahrszene am Beispiel einer Scheinwerfergeometrie, die mehrere Leuchtquellen unterschiedlicher Form und Größe beinhaltet, darzustellen und anhand der experimentellen Ergebnisse eine Evaluierung des Konzepts durchzuführen.

Zunächst wird der Versuchsaufbau der prototypischen Umsetzung vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Kalibrierung der Komponenten, um eine perspektivisch entzerrte Darstellung und eine gezielte Wiedergabe

von Leuchtdichten zu ermöglichen. Schließlich wird die Scheinwerfercharakteristik eines entgegenkommenden Porsche Panamera (Typ G2) mit Vier-Punkt-Licht simulativ nachgestellt.

4.2.1 VERSUCHSAUFBAU

Alle nachfolgend erläuterten Materialien und Messtechnik sind ebenfalls im Anhang A.2 mit Verweis auf deren Datenblatt beschrieben.

Für die folgenden Untersuchungen steht ein holographischer Diffusor mit den geometrischen Abmessungen von 195 mm x 130 mm und einer Dichte von 16 Pixeln pro Quadratmillimeter zur Verfügung, der zur einfacheren Handhabung auf einer 3 mm dicken Glasplatte aufgebracht ist. [46]

Der Versuchsaufbau erfolgt, wie in Abbildung 4.3 aufgezeigt, mit einer Front- und Rückprojektion unter Berücksichtigung der optimalen Reflexionscharakteristik und maximaler resultierender Eye-Box des holographischen Diffusors. [46]

Die Darstellung der Rückprojektion der statischen Umfeldszene erfolgt mittels eines *Epson EH6100* Projektors. Als Medium für die Rückprojektion dient ein Rückprojektionsschirm mit einem Peak-Gain von 0.3 und einem Half-Gain-Winkel von 70°. Als Frontprojektor kommt ein *Optoma W403M* zum Einsatz. [46]

Der holographische Diffusor ist um 5° zur horizontalen geneigt und wird vollflächig vom Frontprojektor bestrahlt. Die resultierende Eye-Box erreicht eine Größe von 30 mm × 60 mm in etwa $0,45$ m Abstand. [46]

Die Messung der Leuchtdichte erfolgt mittels einer Leuchtdichtekamera *LMK 5 color* (LMK). Um die hohe resultierenden Leuchtdichten erfassen zu können, wird zusätzlich ein Neutraldichtefilter (1000x) vor das 25 mm Objektiv der LMK aufgebracht und kalibriert. [46]

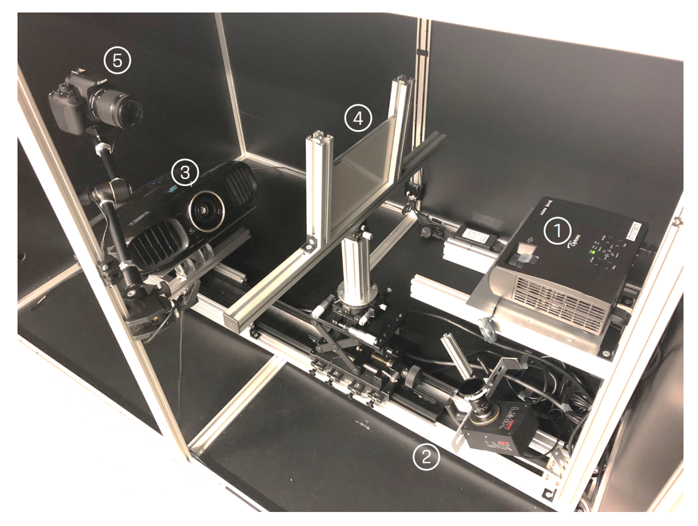


Abbildung 4.3.: Testaufbau mit (1) Frontprojektion, (2) Leuchtdichtekamera, (3) Rückprojektion, (4) Rückprojektionsschirm mit holographischem Diffusor und (5) Spiegelreflexkamera zur geometrischen Kalibrierung [46]

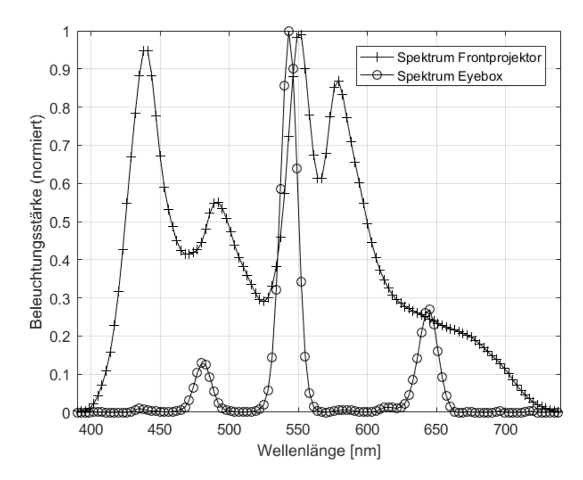


Abbildung 4.4.: Normiertes Spektrum des Frontprojektors und normiertes resultierendes Spektrum der Eye-Box-Mitte, vergleiche [46]

Der Einfluss von Störgrößen wird minimiert, indem alle Komponenten in einer verschließbaren Dunkelkammer verbaut und von außerhalb angesteuert werden. [46]

Für die Durchführung der Versuche liegt ein Diffusor mit ungleichen Effizienzen in RGB vor, vergleiche Anhang A.2.6. Eine Messung des Spektrums des Projektorlichts vor und nach der Beugung am holographischen Diffusor verdeutlicht die Auswirkungen auf das resultierende Bild. Die Messung wird mit Hilfe eines *CL-500A* Spektrophotometers jeweils im Zentrum am Projektionsschirm und der Eye-Box ermittelt. Wie in Abbildung 4.4 aufgezeigt, wird das resultierende Bild von grünen Lichtanteilen dominiert. [46]

Durch eine entsprechende Farbkalibrierung und einer daraus resultierenden starken Reduktion des Grünanteils im Projektorlicht ist es möglich, eine Balance der Farben zu erreichen. Nach PIAO ET AL. [79] sind ausgeglichene Effizienzen in der Herstellung holographischer Diffusoren

Tabelle 4.2.: Standardabweichung (SD) und maximale Abweichung (ME) des Reprojektionsfehler der extrinsischen Kalibrierung in horizontaler (u) und vertikaler (v) Pixelrichtung

[Pixel]	**SD in u**	**SD in v**	**ME in u**	**ME in v**
Frontprojektion	0,88	0,45	2,80	2,32
Rückprojektion	1,14	0,74	1,14	4,24

prinzipiell möglich und ein Ausgleich ist bei entsprechend verbessertem Diffusor nicht notwendig. Eine Farbkalibrierung mit dem vorliegenden Prototypen hat ein in der Helligkeit stark reduziertes Gesamtbild zur Folge und wird daher in diesem Versuchsaufbau nicht angewandt. Für die folgende prototypische Evaluierung wird der Aufbau somit als ausreichend angesehen. [46]

4.2.2 KALIBRIERUNG DES AUFBAUS

Eine initiale Kalibrierung des Aufbaus wurde im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit von BOSSLER [80] durchgeführt.

Um eine verzerrungsfreie Projektion zu erhalten, werden alle Projektoren und Kameras intrinsisch und extrinsisch kalibriert. Die intrinsische Kalibrierung der LMK basiert auf der Methode von ZHANG [81] und wurde mit Hilfe der Toolbox von BOUGET [82] durchgeführt. Die intrinsische Kalibrierung beider Projektoren wird mit Hilfe der von MORENO und TAUBIN [83] vorgestellten Methodik bestimmt. Für die Projektorkalibrierung wird auf eine *Canon EOS 700D* Spiegelreflexkamera zurückgegriffen. [46]

Mit einer extrinsischen Kalibrierung, basierend auf der Methode von FALCAO ET AL. [84] werden die Relativkoordinaten und Orientierung der einzelnen Geräte ermittelt. Mit den erhaltenen Modellen werden die

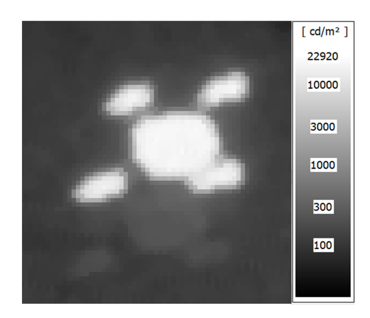


Abbildung 4.5.: Doppelbild resultierend aus unterschiedlichen Bildebenen in logarithmischer Darstellung

im Versuchsaufbau auftretenden projektive Verzerrungen ausgeglichen und die Abbildungen der Front- und Rückprojektors zusammenführt, vergleiche Tabelle 4.2.

Die Darstellung der Rück- und Frontprojektion auf zwei verschiedenen Bildebenen führt bei hellen Frontprojektionen zu einem schwach ausgeprägten Doppelbild, das nicht durch Kalibrierung behoben werden kann, vergleiche Abbildung 4.5. Nicht gebeugtes Licht der Frontprojektion trifft hierbei, bedingt durch die Dicke der Glasscheibe des Diffusors, auf die 3 mm entfernte Rückprojektionsscheibe. Das Doppelbild kann durch direktes Aufbringen des holographischen Diffusor auf der Rückprojektionsscheibe in zukünftigen Aufbauten vermieden werden.

Um die Scheinwerfer mit vorgegebenen Leuchtdichten darzustellen, ist zudem eine Leuchtdichtekalibrierung erforderlich. Dazu werden jeweils die Grauwerte des Frontprojektors in Gruppen von 3 x 3 Pixeln auf die in diesem Aufbau resultierenden Leuchtdichten der LMK abgebildet und als Look-Up-Tabelle hinterlegt. [46] Abbildung 4.6 zeigt den Verlauf von neun Beispielpixelgruppen nach einer Interpolation über 26 gemessene Helligkeitsstufen in einem 12° x 4°-Bildausschnitt um die Folienmitte.

Mit Hilfe dieser Kalibriermethode können Effekte wie Hotspots und Inhomogenitäten kompensiert und Ziel-Leuchtdichten für Simulationss-

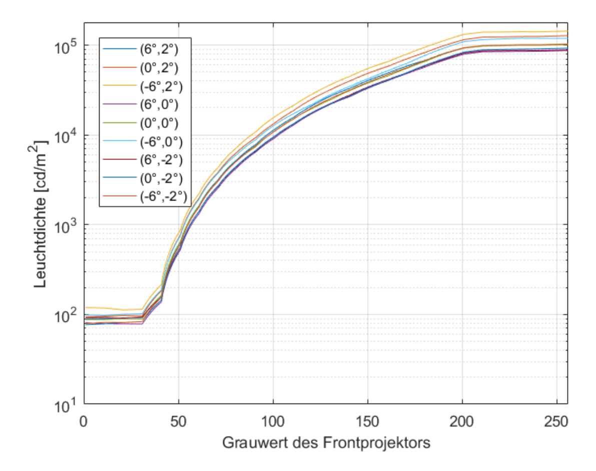


Abbildung 4.6.: Zuordnung von Grauwerten des Projektors zu Leuchtdichten in Abhängigkeit der Position auf dem holographischen Diffusor aus der Sicht des Kamerakoordinatensystems, wobei der Koordinatenursprung (0°,0°) der optischen Achse der LMK entspricht

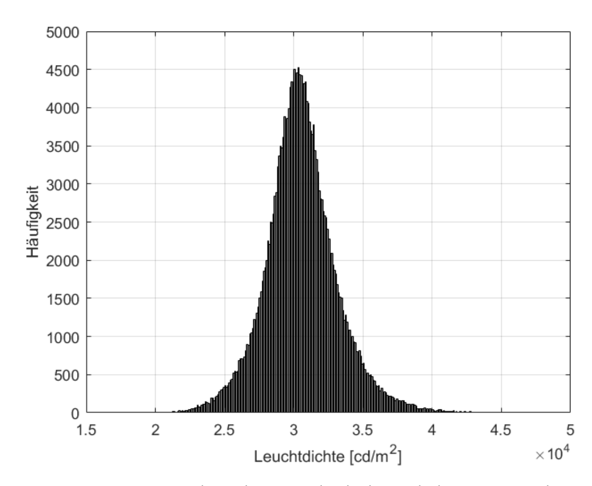


Abbildung 4.7.: Histogramm über die Leuchtdichte-Fluktuationen bei einer Zielleuchtdichte von 30.000 cd / m^2 im betrachteten 12° x 4°-Bildausschnitt

zenen vorgegeben werden [46]. Lokale Schwankungen um die Zielleuchtdichte sind in Leuchtdichtemessungen auch nach Anwendung der Kalibrierung noch ersichtlich. Diese können in zukünftigen Untersuchungen mit Projektoren, die eine deutlich höhere Farbtiefe ermöglichen, verringert werden.

In Abbildung 4.7 werden die verbleibenden Leuchtdichteschwankungen in einem Histogramm anhand einer Ziel-Leuchtdichte von 30.000 cd/m^2 aufgezeigt. Der Median über alle Messwerte beträgt hierbei 30.430 cd/m^2. Die dominierenden Schwankungen lassen sich auf die limitierten Diskretisierungsschritte bei Abbildung der Leuchtdichten auf die lediglich 255 zu Verfügung stehenden Helligkeitsstufen der Projektorpixel auf einen Leuchtdichtebereich zwischen 0 und 140.000 cd/m^2 zurückführen. Weitere Effekte, wie beispielsweise lokale Schwankungen der Effizienz im Diffusor werden ebenfalls nicht kompensiert [46].

Die Ergebnisse zeigen, dass in diesem Versuchsaufbau und im betrachteten Ausschnitt des Diffusors Lichtquellen mit maximalen Leuchtdichten von etwa 80.000 cd/m^2 bis 140.000 cd/m^2 dargestellt werden können. Neben den Einschränkungen durch die Diskretisierung des Projektors, resultieren die Schwarzwerte des Projektors bereits in Leuchtdichten von etwa 80 cd/m^2 bis 120 cd/m^2 und führen damit zu einer Überstrahlung der Nachtfahrszene auf der Rückprojektion.

4.2.3 SIMULATION EINER STATISCHEN NACHTFAHRSZENE

Mit den im aufgezeigten Versuchsaufbau erreichbaren Leuchtdichten können Helligkeiten in der Größenordnung des Abblendlichts entgegenkommender Fahrzeuge nachgestellt werden, vergleiche Abschnitt 3.2.1. Die Darstellung der Scheinwerfer kann dafür mit zwei unterschiedlichen Ersatzmodellen realisiert werden. Die erste Methode nutzt für die

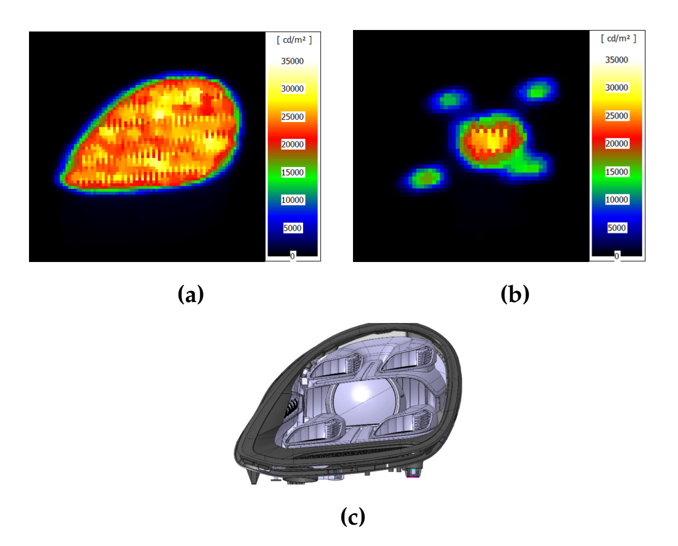


Abbildung 4.8.: Darstellung zweier Methoden den Scheinwerfer als leuchtende Fläche auf dem holographischen Diffusor abzubilden: (a) vollflächige Darstellung (b) nur leuchtende Scheinwerferkomponenten (c) CAD-Modell als Referenz. Beide dargestellt mit einer Zielleuchtdichte von 30.000 $\mathrm{cd/m^2}$, vergleiche [46]

Darstellung die volle Scheinwerferfläche und erlaubt durch die größere leuchtende Bildfläche die Darstellung geringerer Zielleuchtdichten. Eine zweite Methode nutzt, abgeleitet aus einem CAD[3]-Modell, die realen leuchtenden Flächen des Scheinwerfers und erlaubt damit eine realistischere Wiedergabe. Abbildung 4.8 zeigt Messungen mit beiden umgesetzten Modellen im Vergleich. [46]

Obwohl eine homogene Zielleuchtdichte und ein diskreter Zustandsübergang von beleuchteten in unbeleuchtete Bereiche definiert wurde, führt die eingeschränkte Darstellungsmöglichkeit hoher statischer Kontraste der Projektoren zu Ungenauigkeiten in den Übergangsbereichen. Die nach der Leuchtdichtekalibrierung verbliebenen lokalen Schwankungen sind in dieser Darstellung ebenfalls ersichtlich. [46]

Um den Vergleich mit einer realen Fahrszene durchführen zu können, wird eine Leuchtdichtemessung eines entgegenkommenden Porsche Panamera (Typ G2) mit PDLS+[4] Scheinwerfern unter Lichtlaborbedingungen aufgenommen. Die relativen Abstände der LMK und des linken Scheinwerferfokuspunktes betragen $(x, y, z) = (20\,\text{m}, 1{,}5\,\text{m}, 0{,}4\,\text{m})$, vergleiche Abbildung 4.9. [46]

Die Scheinwerfer dieser Referenzszene befinden sich im Versuchsaufbau in dem im vorherigen Abschnitt evaluierten $12^\circ \,\text{x}\, 4^\circ$-Fenster um die Folienmitte. Das Bild der Rückprojektion wird durch die Umfeldsimulation VTD aus der selben virtuellen Distanz und Perspektive wie der LMK-Referenzmessung erstellt. Das darin visualisierte Fahrzeug stellt ein importiertes CAD-Modell des gemessenen Versuchsfahrzeugs dar. Die Projektion wird durch die in Abschnitt 4.2.2 dargestellten Methoden geometrisch korrigiert. [46]

Die Zielleuchtdichte wird nach folgender Gleichung bestimmt, wobei I_v der goniophotometrisch gemessenen Lichtstärke des Scheinwerfers und

[3] Kurzform für Computer-Aided-Design (engl.)

[4] Kurzform von Porsche Dynamic Light System Plus

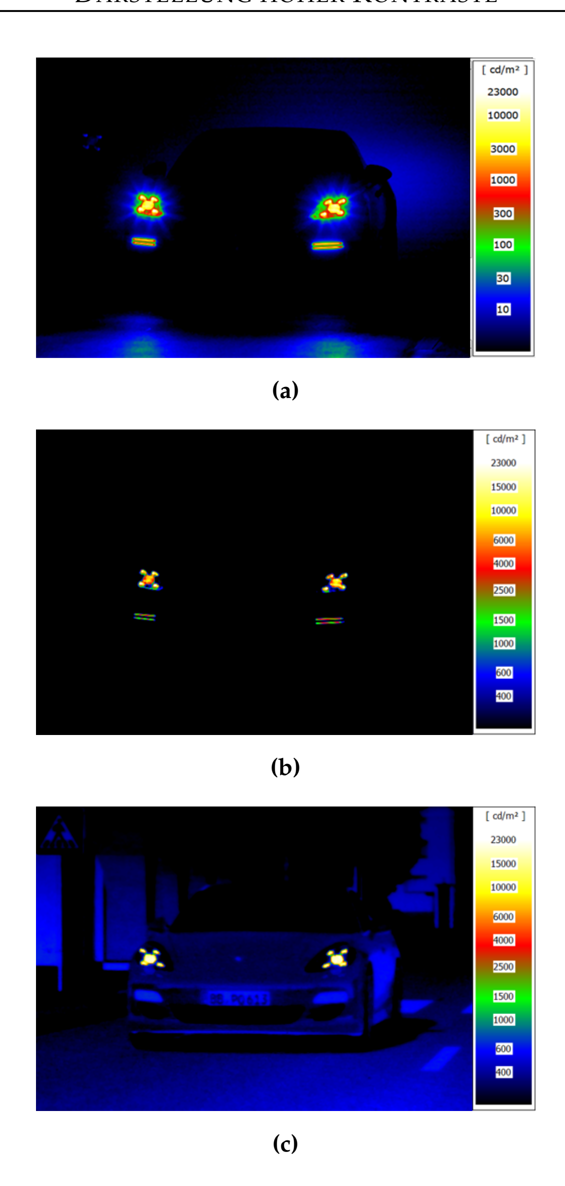


Abbildung 4.9.: Leuchtdichtemessung eines entgegenkommen Panamera (Typ G2) mit Abblendlicht in etwa 20 Meter Entfernung als (a) reales Fahrzeug in mehrfach-logarithmischer Darstellung (b) reales Fahrzeug und (c) im Versuchsaufbau nachgestellten Szene jeweils in einfacher logarithmischer Darstellung, vergleiche [46]

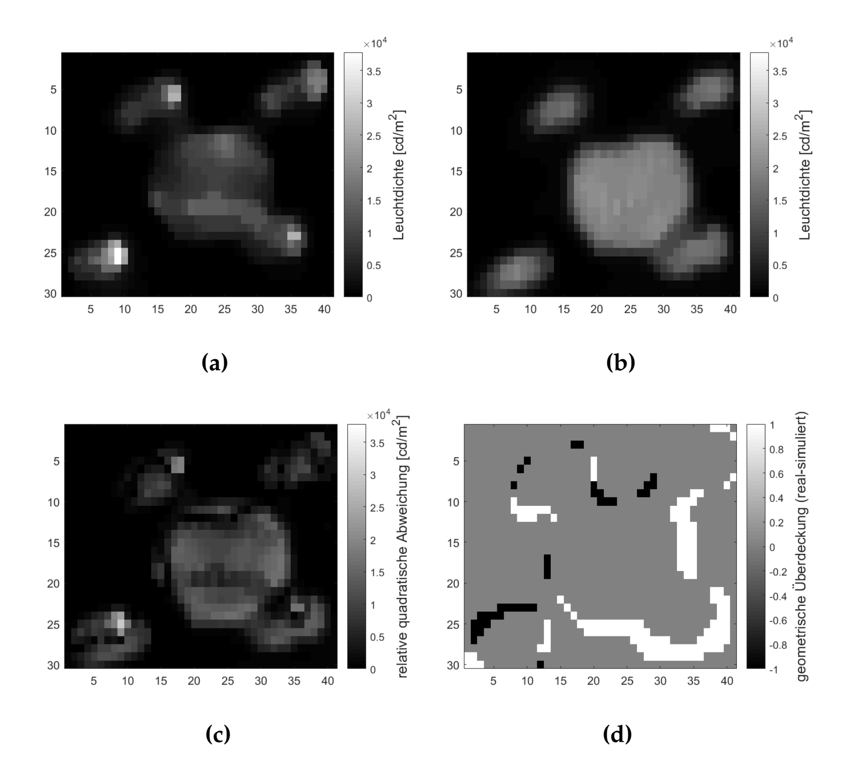


Abbildung 4.10.: Identischer Bildausschnitt des (a) realen Scheinwerfers der Referenzmessung, (b) des simulierten Scheinwerfers im Versuchsaufbau, (c) der absoluten Abweichung und (d) der geometrischen Überdeckung

A_H der entsprechenden Gesamtfläche der Lichtquellen mit Orientierung ϵ_H entspricht [46] :

$$L_v = \frac{I_v}{A_H \cdot \cos(\epsilon_H)} \tag{4.3}$$

In der Realmessung und der Messung im Versuchsaufbau gemäß Abbildung 4.9 ist der Hintergrund zu dunkel $(0 - 2\,\mathrm{cd/m^2})$, um im logarithmisch skalierten Leuchtdichtebild erkennbar zu sein. Damit im Versuchsaufbau die Überstrahlung des Frontaufbaus messbar ausgeglichen werden kann, wird die mittlere Leuchtdichte des Hintergrundbilds auf etwa 450 $\mathrm{cd/m^2}$ angehoben. [46]

In Abbildung 4.10 wird ein identischer Bildausschnitt des linken Fahrzeugscheinwerfers der Referenzmessung und des Versuchsaufbaus nebeneinander gestellt. Der Vergleich beider Messungen ergibt im betrachteten Ausschnitt eine mittlere absolute Abweichung der Leuchtdichte von 3.505 $\mathrm{cd/m^2}$ und eine geometrische Überdeckung von realem und simuliertem Scheinwerfer von 86,3 % der Bildpixel über einem Schwellwert von 800 $\mathrm{cd/m^2}$.

4.3 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE UND EMPFEHLUNGEN FÜR WEITERE UNTERSUCHUNGEN

Die in diesem Kapitel vorgestellte Grundidee zur Auftrennung der Darstellung heller und dunkler Bereiche einer virtuellen Nachtfahrt mittels einer Front- und Rückprojektion, ermöglicht die Evaluierung neuer projektorbasierter Methoden, die sich durch einen hohen Wirkungsgrad auszeichnen. Im Rahmen dieses Kapitels werden zwei Ansätze entwickelt und evaluiert: Die Eignung retroreflektiver Materialien und die Anwendungsmöglichkeit holographischer Diffusoren. [46] In einer vergleichenden konzeptionellen Evaluierung in Abschnitt 4.1 stellt sich der

Ansatz basierend auf holographischen Diffusoren im Vergleich zur definierbaren Einstrahl-Rückstrahl-Charakteristik und die damit verbundene Freiheitsgrade in Projektor und Kameraposition, der Definition einer Eye-Box und der resultierenden Bildhomogenität als vielversprechender heraus. Anhand eines vorliegenden Prototypen eines holographischen Diffusors wird die Eignung der Methode experimentell untersucht.

Um eine valide Stimulation von Fahrerassistenzkameras durch virtuelle Umfeldsimulationen zu ermöglichen, ist neben der geometrisch korrekten Darstellung des Umfelds auch die korrekte Position und Geometrie der zusätzlichen hellen Texturen, die Wiedergabe korrekter Helligkeiten und Kontraste sowie die korrekte Farbdarstellung essentiell.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine intrinsische und extrinsische Kalibrierung die Rück- und Frontprojektion plausibel und mit hoher Genauigkeit zusammengeführt werden können. Für die Darstellung der Scheinwerfertextur werden zudem zwei Methoden aufgezeigt, wobei sich das Porsche-Vier-Punkt-Licht mit einer hohen Güte in Position und Geometrie in die Umfeldsimulation einfügt. Der in dieser Arbeit aufgezeigte projektorbasierte Ansatz ermöglicht somit eine plausible geometrische Darstellung. Durch die Allgemeingültigkeit von geometrischen Kalibrierungen lässt sich eine korrekte Darstellung auch auf weitere Texturen, wie beispielsweise retroreflektierender Verkehrszeichen extrapolieren. Im Vergleich dazu sind in bereits vorgestellten Konzepten wie HAYCOCK ET AL. [57], HWANG ET AL. [56] oder MÜLLER [55] keine plausiblen Scheinwerfertexturen darstellbar, da Leuchtquellen in bestehenden Methoden durch zusätzlich angebrachte LEDs in die Umfeldsimulation integriert werden, vergleiche Abschnitt 3.1.

Hinsichtlich der maximalen Helligkeiten konnten in den experimentellen Untersuchungen die Größenordnungen des vorgestellten Standes der Technik erreicht werden und Helligkeiten in Größenordnung des Abblendlicht sind darstellbar. Im Vergleich zu HWANG ET AL. [56]

wurde die maximale Leuchtdichte deutlich übertroffen während HAYCOCK ET AL. [57] höhere Helligkeiten darstellen kann. Eine grundlegende Limitierung ist jedoch die eingeschränkte Diskretisierung der Ziel-Leuchtdichten durch den Projektor, wie sie durch die photometrische Kalibrierung ersichtlich wird. Die gewünschten Leuchtdichten können zwar im Mittel erreicht werden, jedoch resultieren daraus lokale Schwankungen die eine exakte Wiedergabe von Helligkeiten erschweren.

Die Anforderungen an die Darstellung hoher statischer Kontraste wird in diesem Aufbau, bedingt durch Limitierungen im Versuchsaufbau, nur eingeschränkt erfüllt. Durch das Design einer Eye-Box konnte eine im Stand der Technik durch HAYCOCK ET AL. [57] aufgeführte Limitierung konzeptionell vermieden werden, die zu ungewollten Aufhellungen im Simulator führt und dadurch den dargestellten statischen Kontrast verringert. Resultierend aus der hohen Effizienz des holographischen Diffusors und den Limitierungen des verwendeten Frontprojektors in seiner Schwarzwertdarstellung, führt dies trotzdem zu einer Überstrahlung der Umfeldsimulation in diesem Versuchsaufbau.

Die Darstellungstreue von Farben konnte im Rahmen dieser Arbeit, bedingt durch dominierende Unterschiede der RGB-Beugungseffizienzen im vorliegenden holographischen Diffusor nicht experimentell untersucht werden. Wird die Farbwiedergabe konzeptionell betrachtet, so sind nach PIAO ET AL. [79] ausgeglichene Effizienzen für bis zu drei Wellenlängen möglich. Der bestehende Stand der Technik von beispielweise HAYCOCK ET AL. [57] oder HWANG ET AL. [56] sieht Farbdarstellungen konzeptionell hingegen nicht vor.

Der in dieser Arbeit entwickelte Versuchsaufbau unterliegt behebbaren methodischen Limitierungen, die in der aufgeführten Bewertung bereits angeklungen sind und im folgenden zusammengefasst werden:

- Die ungleichen RGB-Beugungseffizienzen des untersuchten holographischen Diffusors führen zu einem grün-dominierten Bild. Eine Evaluierung der Farbdarstellungen ist in diesem Experiment somit nicht möglich.
- Der Projektor der Frontprojektion zeigt in den durchgeführten Versuchen Einschränkungen im statischen Kontrast, Schwarzwert und der Diskretisierung der Helligkeit, die zu weichen Übergängen, Überstrahlung des Hintergrundbildes und Ungenauigkeiten in der Leuchtdichtewiedergabe führen.
- Die Leuchtdichte stellt als Maßeinheit eine Vergleichbarkeit zum bestehenden Stand der Technik sicher und es kann darüber hinaus eine Allgemeingültigkeit abgeleitet werden. Fahrerassistenzkameras besitzen jedoch deutlich abweichende spektrale Sensitivitäten, vergleiche 2.2.1. Diese sind in zukünftigen Untersuchungen als Helligkeitsmaß anzustreben. Folglich sind goniophotometrisch erhaltene Abstrahlcharakteristiken von Scheinwerfern auch in ihrer spektralen Empfindlichkeit zu erfassen, um diese in Helligkeit und Farbtreue korrekt darstellen zu können.
- Bedingt durch den Abstand der Bildebenen und der Kameraperspektive treten Doppelbilder auf, die durch direktes Aufbringen des Diffusors auf der Rückprojektionsscheibe vermieden werden können.

Die diskutierten Ergebnisse mit holographischem Diffusor und die aufgezeigten konzeptionellen Vorteile zum Stand der Technik motivieren weitere wissenschaftliche Untersuchungen. Zukünftige Versuche können am Beispiel einer konkreten Fahrerassistenzkamera durchgeführt werden. Dabei können der holographische Diffusor und der zugehörige Projektor bereits auf die spektrale Sensorempfindlichkeit der Ziel-Kamera ausgelegt werden und damit die Untersuchung plausibler Farbdarstellungen und Helligkeiten im Kamerabild ermöglichen. Ebenso kann, um

höhere Wirkungsgrade zu erzielen, das Stapeln dreier monochromatischen Diffusoren evaluiert werden [46].

KAPITEL 5

TESTUMGEBUNG UND BEWERTUNGSMETHODIK FÜR PIXELBASIERTE LICHTFUNKTIONEN

In diesem Kapitel wird eine gesamtheitliche konzeptionelle Entwicklung und experimentelle Untersuchung eines HiL-Testsystems für pixelbasierte Lichtfunktionen durchgeführt, die einen funktionalen Test objektiv und reproduzierbar ermöglicht.

In Abschnitt 5.1 wird die grundlegende HiL-Architektur für adaptive und assistierende Lichtfunktionen evaluiert, bei der die Wirkkette an eine virtuelle Umfeldsimulation angebunden wird. Um eine valide Bewertung von zeitkritischen Lichtfunktionen zu ermöglichen, wird diese in Abschnitt 5.2 um eine Synchronisationsmethode für Ein- und Ausgangsdaten der Wirkkette erweitert. Auf Basis dieser erweiterten Architektur werden in Abschnitt 5.3 Ansätze zur Implementierung von Bewertungsmetriken dargelegt.

In Abschnitt 5.4 wird die prototypische Umsetzung und Untersuchung des HiL-Testsystems aufgezeigt. Die experimentellen Ergebnisse werden in Abschnitt 5.5 abschließend diskutiert.

Teile der nachfolgenden Abschnitte wurden vom Autor bereits in [1] [2] veröffentlicht und sind stellenweise wörtlich übernommen.

Eine Erweiterung der in Abschnitt 5.2 entwickelten Synchronisationsmethode auf weitere Sensoren in einem Testverbund dient als Grundlage

der folgenden vom Autor eingereichten Patentschriften [85] [86]. Die erweiterten Anwendungsfälle werden jedoch in dieser Arbeit nicht diskutiert.

5.1 ARCHITEKTUR DES HIL-TESTSYSTEMS

Die nachfolgenden Betrachtungen werden unter der Annahme einer zentralen Systemarchitektur von Lichtfunktionen durchgeführt, vergleiche Abschnitt 2.2.

Die Integration aller Steuergeräte eines Fahrzeuges an ein HiL-Testsystem inklusive aller realen Sensoren und Aktoren ist für den funktionalen Test von Lichtfunktionen ökonomisch nicht sinnvoll. Die Stimulation von beispielsweise realen Fahrdynamiksensoren über einen Hexapod oder die Integration realer Lenkungen haben erhebliche Aufwände zur Folge. Die Anbindung einer realen Komponente kann als notwendig angesehen werden, wenn sie als Teil des SuT erforderlich ist oder wenn eine valide Restbussimulation eines Teilsystems hohe oder ständig wiederkehrende Modellierungsaufwände erzeugt. Einfache periphere Systeme und Aktoren werden daher üblicherweise über Modelle dargestellt. Sobald die Bewertung zeitkritischer Funktionen durchgeführt wird, ist möglichst die gesamte datenverarbeitende Sensor-Aktor-Wirkkette als SuT zu integrieren.

Das SuT von Lichtfunktionen setzt sich aus den Elementen der im Abschnitt 2.2 vorgestellten Wirkkette zusammen. Als Gesamtverbund für den Test von adaptiven und assistierenden Lichtfunktionen ergeben sich die folgenden Komponenten:

- Das Steuergerät mit Lichtfunktion ist im HiL-Testsystem als reale Hardwarekomponente integriert.

- Die Integration der Fahrerassistenzkamera ist mit unterschiedlichen Methoden an HiL-Testsystemen etabliert, vergleiche Abschnitt 3.1. Hinsichtlich möglicher Abbildungsfehler, der Justage und vor allem der für Nachtfahrten essentiellen Darstellung hoher Dynamikbereiche weist der aktuelle Stand der Technik der direkten Bilddateneinspeisung erhebliche Vorteile gegenüber der Einspeisung über einen Monitor oder Projektor auf und wird in diesem Kapitel für die Kameraintegration angewandt.
- Periphere Busteilnehmer, Bedienelemente wie der Lenkstockhebel oder Sensordaten wie Navigationsdaten, die bei Lichtfunktionen hauptsächlich Zustandswechsel bewirken, können über Restbussimulationen oder Sensormodelle dargestellt werden, vergleiche [25].
- Fahrdynamik, Reifen und Lenkung sind als Physikmodelle abbildbar. Vorgehensweisen für ein validiertes Physikverhalten der Modelle im HiL-Simulator sind etabliert, vergleiche [87].

Integrationsmethoden für das Teilsystem Scheinwerfer werden im Kontext einer geeigneten Datenbasis für die Bewertung von Lichtfunktionen im nachfolgenden Abschnitt im Detail betrachtet.

5.1.1 DATENBASIS FÜR DIE FUNKTIONSBEWERTUNG

Die Auswahl einer geeigneten Datenbasis zur Bewertung der Lichtfunktion legt implizit die Aussagekraft möglicher Testfälle über das SuT fest.

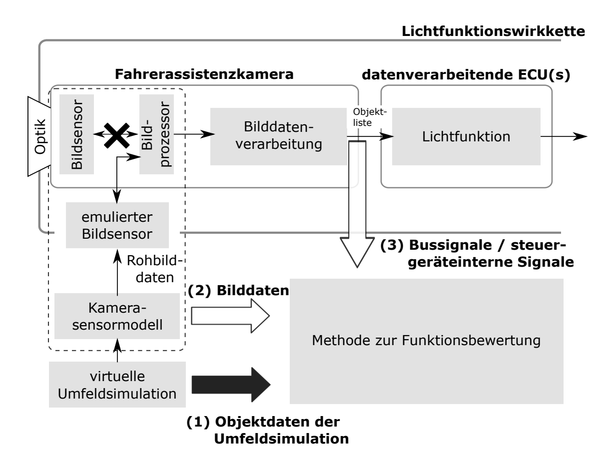


Abbildung 5.1.: Datenquellen mit Objektzustand der Testumgebung zur Bewertung der Lichtfunktion dargestellt als große Pfeile. (1) entspricht der in dieser Arbeit präferierten Datenquelle

ERFASSUNG DER ZUSTÄNDE DER TESTUMGEBUNG

Wie in Abbildung 5.1 durch die Pfeildarstellung markiert, vergleiche Abbildung 2.6 für die Gesamtwirkkette und Abbildung 3.2 für die Bilddateneinspeisung, gibt es mehrere mögliche Datenquellen mit der die Objektzustände der Testumgebung für eine Funktionsbewertung erfasst werden können.

Die Objektdaten der Umfeldsimulation (1) stellen eine objektive Referenz dar, in der alle Zustände zu jedem Berechnungsschritt vorliegen. Diese werden in der vorliegenden Arbeit als geeignete objektive Bewertungsgrundlage angesehen und der Evaluierungseinheit zugeführt.

Ein weitere Möglichkeit besteht darin, die virtuellen Bilddaten der Umfeldsimulation (2) zu nutzen. Da die Testumgebungszustände lediglich visuell enthalten sind, ist die notwendige Information nur implizit verfügbar und ein Mehrwert ist gegenüber dem direkten Zugriff auf die

Objektdaten nicht gegeben. Die Nutzung von Bilddaten aus der Perspektive und Verbauposition der Scheinwerfer stellt jedoch eine Möglichkeit dar, durch eine Überlagerung mit einer Visualisierung der Lichtverteilung, Aussagen für beispielsweise die Ausblendfunktion zu treffen. Eine Bewertung auf Grundlage einer Visualisierung wird in dieser Arbeit allerdings nicht betrachtet, vergleiche Abschnitt 3.4.

Weiterhin liegen am Funktionseingang der Lichtfunktion auch Objektlisten (3) vor, vergleiche Abschnitt 2.2.2, die nach der Verarbeitung und Interpretation durch die Bildverarbeitung bereit gestellt wird. Diese stehen allerdings in geringerer Frequenz und abhängig vom Datenmodell des Fahrzeugbusses mit bestenfalls gleichem Informationsgehalt wie die direkten Objektdaten der Umfeldsimulation zur Verfügung. Da sie durch die Bilddatenverarbeitung nicht unbedingt die objektive Referenz der Testumgebung repräsentieren, werden die Bussignale in der vorliegenden Arbeit lediglich als Plausibilisierungsgröße verwendet.

Weitere Testumgebungszustände wie Fahrdynamikgrößen oder die Stellung des Lichtdrehschalters können für die Funktionsbewertung direkt aus den Restbusmodellen abgeleitet werden.

ERFASSUNG UND VISUALISIERUNG DER LICHTVERTEILUNG

Abbildung 5.2 stellt mögliche Datenbasen dar, die als Informationsgrundlage für eine Evaluierung des aktuellen Zustands der Lichtverteilung herangezogen werden können, vergleiche Abbildung 5.1.

Helligkeitsmatrizen (1) und je nach Scheinwerfertyp auch Steuersignale, vergleiche Abschnitt 2.2, stellen den direkten Ausgang der Lichtfunktion dar. In zentralen Systemarchitekturen liegen diese als Bussignale vor, vergleiche Abschnitt 2.2.2. Bussignale stehen dem HiL-Simulator nativ zur Verfügung und können einer Bewertungseinheit direkt zugeführt

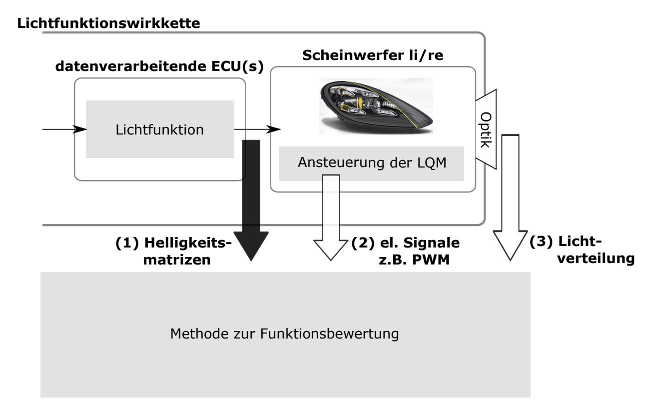


Abbildung 5.2.: Datengrundlage und Erfassung der Lichtverteilung zur Lichtfunktionsbewertung dargestellt als große Pfeile. (1) entspricht der in dieser Arbeit präferierten Datenquelle

werden. Diese Signale enthalten die wesentlichen Informationen für eine Bewertung des Funktionsverhaltens. Entsprechende funktionale Anforderungen müssen folglich auf diese Helligkeitsmatrizen spezifiziert werden. Unter der Annahme, dass Applikationsparameter wie Kennlinien und statische Lichtverteilungen bekannt sind, kann auch die Umsetzung auf Basis der Helligkeitsmatrizen überprüft werden. Sind zudem die Abstrahlcharakteristiken der einzelnen Lichtpixel bekannt, kann damit die geometrische Umsetzung der Ausblendfunktion evaluiert werden. Im Rahmen der weiteren Betrachtungen dieser Arbeit wird eine Untersuchung und Bewertung auf Grundlage von Helligkeitsmatrizen auf Bussignalen durchgeführt. Der Begriff Bussignale steht hierbei, je nach verwendeten Scheinwerfer-Typ, stellvertretend für die Erfassung der Pixelintensitäten basierend auf herkömmlichen Kommunikationsmethoden, wie CAN-Bus, als auch auf erfasste Helligkeitsmatrizen basierend auf Automotive Ethernet oder LVDS.

Falls weitere Verhaltenslogiken im Scheinwerfersteuergerät vorgesehen sind, ist der Datenabgriff der elektrischen Signale vor dem LQM

(2) notwendig. Diese Datenerfassung kann spezielle Messsysteme des Scheinwerferlieferanten erfordern.

Erfordert die Bewertung zusätzlich zu funktionalen Aussagen auch photometrische Bewertungsgrößen, so können diese Informationen entsprechend durch ein Modell auf Basis der Bussignale, vergleiche [88], oder Messung der realen Lichtverteilung (3) ergänzt werden, vergleiche [68]. Eine echtzeitfähige Erfassung der realen Lichtverteilung erfordert eine entsprechende Kalibrierung und Bildverarbeitung. Die Implementierung eines solchen Messsystems unterliegt jedoch hohen Aufwänden und Platzbedarf, vergleiche Abschnitt 3.4.

Auf Basis der erfassten Bussignale oder der gemessenen Lichtverteilung kann eine Visualisierung der Lichtfunktion in der virtuellen Umfeldsimulation umgesetzt werden. Mit derzeitigem Stand echtzeitfähiger Bildsynthesetechnologien stellt dies lediglich eine funktionale Visualisierung dar und ist als objektive Bewertungsgrundlage nicht geeignet, vergleiche Abschnitt 3.3. [2]

Da die Stimulation der Fahrerassistenzkamera mit virtuell synthetisierten Bilddaten erfolgt, hat die Umsetzung einer Scheinwerfervisualisierung direkte Auswirkung auf die Ausleuchtung der Szene und somit die Kamerastimulation. Eine Voraussetzung für eine valide Integration von virtuellen Scheinwerfern ist die Simulationsgeschwindigkeit der Umfeldsimulation. Diese muss, da es sich um reale Steuergeräte in der Wirkkette handelt, in Echtzeit simuliert werden. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Zeit für die Berechnung der virtuellen Lichtverteilung und Kameraeinspeisung der mittleren Zeit des (nicht enthaltenen) realen Scheinwerfers entspricht, vergleiche [2].

Unter den Annahmen, dass das SuT keinen kamerabasierten Rückkopplungen und Plausibilisierungen unterliegt und eine valide Objekterfassung durch die Kamera nach wie vor erfüllt ist, kann eine Visualisierung von dynamischen Lichtverteilungen als optional angesehen werden.

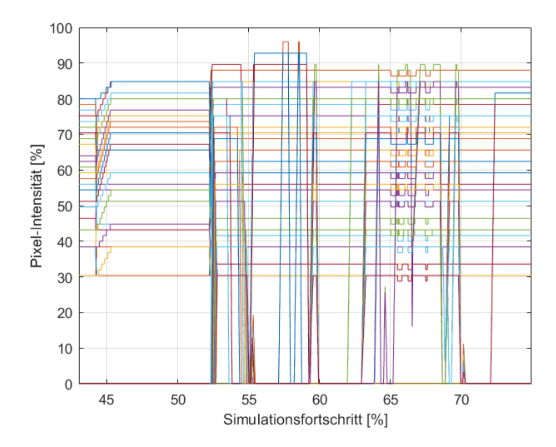


Abbildung 5.3.: Motivation zur Nutzung von Metriken für die Lichtfunktionsbewertung auf Basis der Bussignale eines pixelbasierten Scheinwerfers

FUNKTIONSBEWERTUNG DURCH METRIKEN

Wie durch die Messung in Abbildung 5.3 veranschaulicht, erzeugen die Ausgangssignale von pixelbasierten Lichtfunktionen vor allem in dynamischen Verkehrsszenen, wie Ausblendsituationen oder Lichtfunktionswechsel, auch dynamische Signalverläufe von Helligkeitsmatrizen. Ein direkter Rückschluss auf eine spezifizierte Funktionalität ist bei schnellen zeitlichen Änderungen der Lichtverteilungen kaum auf einzelne Signalverläufe reduzierbar. Eine Vereinfachung der signalbasierten Auswertung kann durch die Abbildung der Bussignale auf *Key-Performance-Indikatoren* (KPIs) mittels Metriken erreicht werden.

Diese KPIs objektivieren das jeweilige Verhalten und müssen für jede Lichtfunktion separat bestimmt werden. Diesen Metriken stehen, wie in den vorangegangen Abschnitten diskutiert, alle Signale zur Verfügung die dem HiL-Simulator zugeführt oder durch Fahrzeug- und Sensormodelle generiert werden. Durch die Implementierung der Metriken im

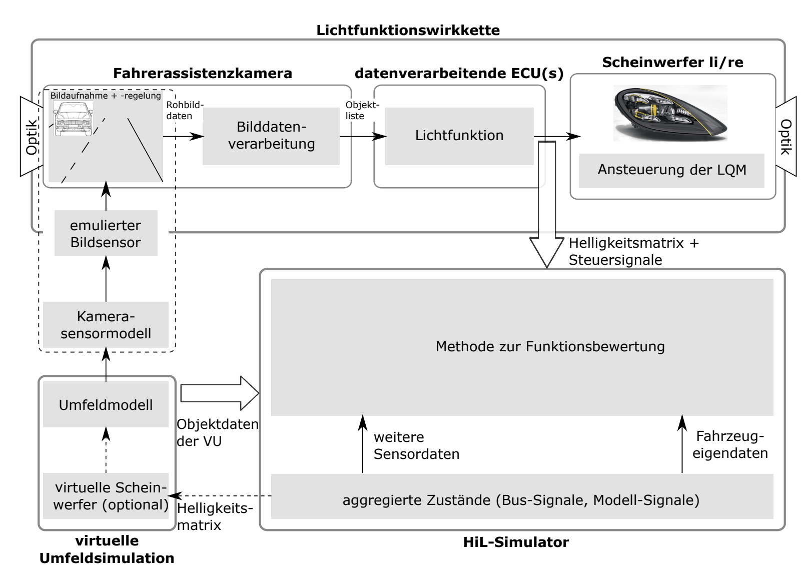


Abbildung 5.4.: Logische Systemarchitektur der Anbindung der Lichtfunktionswirkkette an die Funktionsbewertung im HiL-Testsystem

HiL-Simulator ist eine Online-Auswertung und Evaluation zur Laufzeit der Lichtfunktionstests möglich. Eine Offline-Auswertung ist durch die Aufzeichnung der synchronisierten Datenströme vor der Bewertungseinheit darstellbar.

5.1.2 LOGISCHE SYSTEMARCHITEKTUR

Abbildung 5.4 illustriert die resultierende logische Systemarchitektur der Anbindung der Lichtfunktionswirkkette an die Funktionsbewertung im HiL-Testsystem. Die I/O und Busse der Steuergeräte der Lichtfunktionswirkkette werden mit einem echtzeitfähigen HiL-Simulator verbunden, vergleiche Abbildung 2.2. Die Objektdaten der Umfeldsimulation und

die Helligkeitsmatrix werden der Funktionsbewertung zugeführt.

Neben der Restbussimulation zur Herstellung der Fehlerfreiheit und Testfähigkeit der ECUs, wird die Fahrzeugphysik über ein Fahrzeugmodell zur Generierung von Signalen, wie Eigengeschwindigkeit, Lenkradwinkel und Fahrwerkszustand dargestellt. Das HiL-Testsystem kann um weitere reale Steuergeräte ergänzt werden. Die Anbindung einer Testablaufsteuerung ermöglicht einen automatisierten und reproduzierbaren Funktionstest, vergleiche dazu Abschnitt 2.1.2.

Über eine virtuelle Umfeldsimulation werden bildbasierte Regelkreise, wie die reduzierte Eigenblendung bei Verkehrsschildern, geschlossen. Ebenso werden über die Bilddateneinspeisung der VU kamerabasierte Funktionen, wie die Objektberechnung oder dynamische Kalibrieralgorithmen, passend zur RBS und zu Fahrdynamikmodellen stimuliert. Modellierte Realstrecken ermöglichen zudem die Bereitstellung von virtuellen Navigationsdaten. Werden die Helligkeitsmatrizen nicht visualisiert oder diese Daten nicht als Feedback der Lichtfunktion wieder zugeführt, reduziert sich das HiL-Testsystem bezogen auf die Lichtfunktion zu einem Open-Loop-Stimulator, vergleiche Abschnitt 2.1.2 und Abschnitt 2.2.2.

Die virtuelle Umfeldsimulation stellt zudem durch das Umfeldmodell eine objektive Referenz dar, das zur Evaluierung von Lichtfunktionen verwendet werden kann.

5.2 METHODE ZUR DATENSYNCHRONISATION

Der Test von zeitkritischen kamerabasierten Lichtfunktionen, wie die Ausblendfunktion erfordert eine logische Datensynchronität der erfassten Zustände. In den nachfolgenden Abschnitten wird jeweils eine Syn-

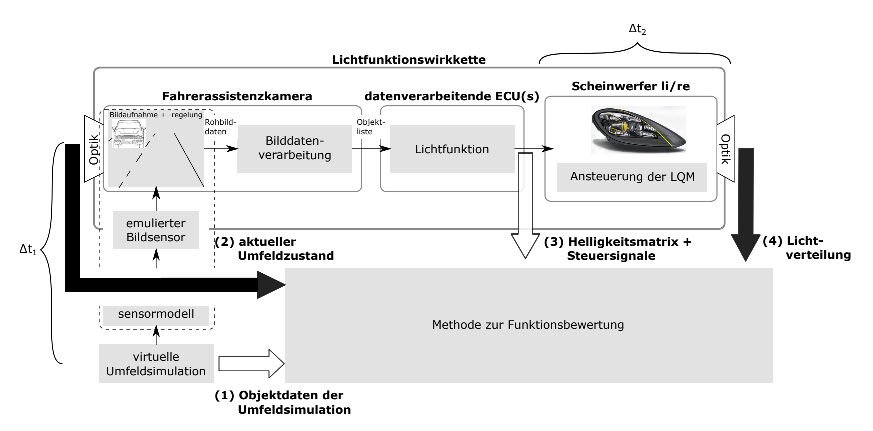


Abbildung 5.5.: Tatsächlicher (weißer Pfeil) und gewünschter (schwarzer Pfeil) synchroner Abgriff von Daten zur Absicherung der Ausblendfunktion, vergleiche [2]

chronisationsmethode für die Bilddateneinspeisung, den Scheinwerferzustand und das Gesamtsystem herausgearbeitet.

Der HiL-Simulator wird dabei als zentrales Messsystem definiert, das alle erfassten Signale auf einer gemeinsamen Zeitachse abbilden kann. Der vollständige Zustand aller Objekte der Umfeldsimulation wird als $\mathbf{O}_k$ und die Lichtverteilung des Scheinwerfers, die die Hellikeitsmatrix und Steuersignale zusammenfasst, als LV_k jeweils zum diskreten Messzeitpunkt t_k des HiL-Simulators bezeichnet. Gleichzeitig wird durch einen zweiten Index auch die Datenquelle aus Sicht des HiL-Simulators gekennzeichnet. Im Nachfolgenden werden dafür DII für die direkte Bilddateneinspeisung, Bus für den Fahrzeugbus oder VU für die virtuelle Umfeldsimulation als Index verwendet.

5.2.1 MOTIVATION DER DATENSYNCHRONISATION

Die erfassten Bussignale und Umfeldsimulationsdaten haben in der aufgezeigten logischen Systemarchitektur in Abschnitt 5.1.2 jeweils unterschiedliche zeitliche Bezugspunkte im Gesamtsystem, vergleiche Abbildung 5.5. Würden diese Daten direkt und ohne Synchronisation in den Metriken zur Lichtfunktionsbewertung verwendet, so würde die Datenverarbeitungszeit des Scheinwerfers $\Delta\, t_2$ und die Datenverarbeitungszeit von Bildgenerierung und -einspeisung $\Delta\, t_1$ unberücksichtigt bleiben. Beide Effekte führen ohne Synchronisationseinheit zu einem invaliden Datenvergleich. [2]

Die Auswirkung der aus beiden Datenverarbeitungen resultierenden Gesamtfehler $\Delta\, t_{ges}$ kann, am Beispiel der Ausblendfunktion, als die Bewertung verfälschende Objektverschiebung interpretiert werden. Die folgende Abschätzung, visualisiert in Abbildung 5.6, zeigt für zwei Verkehrsszenen die resultierenden Verschiebungen bei unterschiedlichen Latenzen auf.

Typische Ausblendsituationen mit geringen Relativgeschwindigkeiten sind beispielsweise Folgefahrten auf einer geraden Landstraße. Im Falle einer relativen Objektdistanz aus Sicht des Scheinwerferkoordinatensystem von $x_{SW} = 30\,\mathrm{m}$ und einer Relativgeschwindigkeit von $\dot{x}_{SW} = 30\,\mathrm{km/h}$ führt dies, siehe (1) in Abbildung 5.6 (a), bei einem beispielhaften zeitlichen Gesamtfehler von $\Delta t_{ges} = 50\,\mathrm{ms}$, zu einer maximalen horizontalen Verschiebung um $\Delta\alpha_{ges} \approx 0,05\,^{\circ}$ im rechten Scheinwerferkoordinatensystem (weitere Annahmen: $\dot{y}_{SW} = 0$, Fahrzeugbreite 2 m, Fahrzeuglänge 5 m, Scheinwerferabstand 1,6 m, Fahrspurbreite 3 m, Fahrzeuge auf Fahrbahnmitte). [2]

Deutlich mehr Dynamik tritt bei der Begegnung zweier Fahrzeuge mit hoher Relativgeschwindigkeit auf (Annahme: $\dot{x}_{SW} = 180\,\mathrm{km/h}$). Bei einer Relativdistanz von $x_{SW} = 30\,\mathrm{m}$ führt dies bereits bei identischer

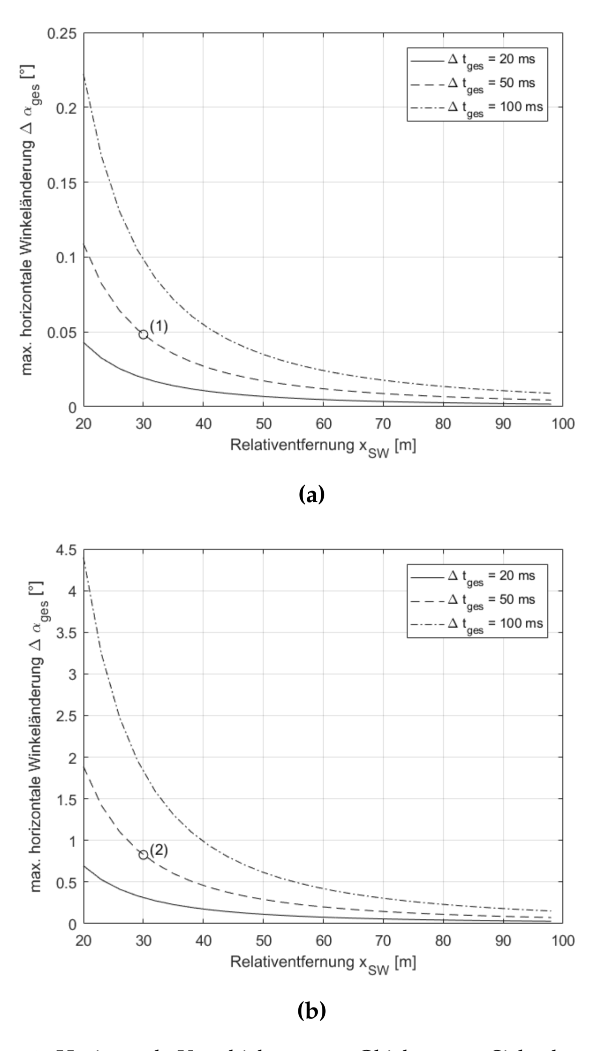


Abbildung 5.6.: Horizontale Verschiebung von Objekten aus Sicht des rechten Scheinwerferkoordinatensystems bei unterschiedlich angenommenen Systemlatenzen für ein (a) vorausfahrendes mit Relativgeschwindigkeit 30 km/h und (b) entgegenkommendes Fahrzeug mit Relativgeschwindigkeit 180 km/h auf einer geraden Fahrbahn

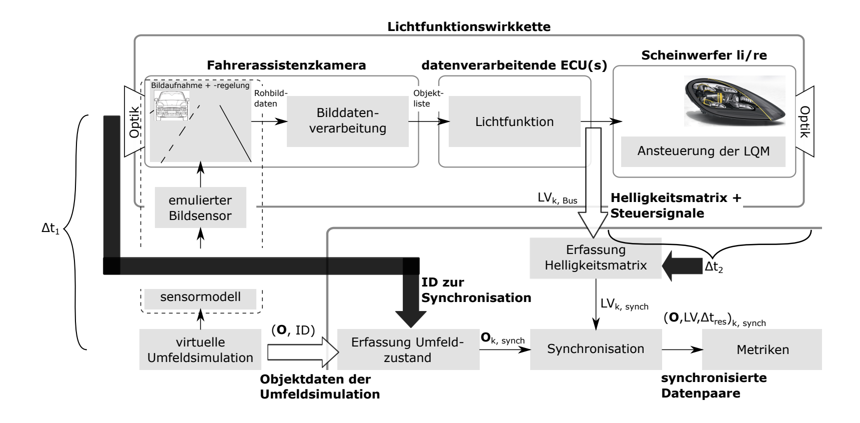


Abbildung 5.7.: Logische Architektur der Synchronisationsmethode

Gesamtlatenz zu einer gesamten Objektverschiebung von $\Delta\alpha_{ges} \approx 0,8\,°$, siehe (2) Abbildung 5.6 (b).

Bei einem angenommenen horizontalen Abstrahlwinkel eines Lichtpixels von $\sim\ 1,0\,°$ in einem 84-Pixel-Modul spielen resultierende Verschiebungen für eine Evaluierung bereits eine zentrale Rolle und sind folglich zu vermeiden oder zu minimieren. [2]

5.2.2 Übersicht über die Synchronisationsmethode

Wie in Abbildung 5.7 visualisiert ist das Ziel der Synchronisationsmethode die Zuordnung der korrekten Ein- und Ausgangswerte zu Datenpaaren die valide auf KPIs abgebildet werden können. Die Methode lässt sich in drei wesentliche Teilschritte zerlegen:

- Methode zur Erfassung des Objektzustands zum Zeitpunkt der Bilddateneinspeisung,

- Methode zur Berücksichtigung der Latenz des Scheinwerfers auf Basis der Bussignale,
- Zusammenführung der Datenströme zu synchronisierten Datenpaaren.

Die Vorgehensweise wird in den nachfolgenden Abschnitten im Detail erläutert.

5.2.3 METHODE ZUR ERFASSUNG DER OBJEKTE IN DER BILDDATENEINSPEISUNG

Die Herausforderungen dieser Methode sind, dass die Objektzustände in den Bilddaten nur noch implizit enthalten sind und zudem keine direkte Verbindung von Bilddateneinspeisung zum HiL-Simulator vorgesehen ist, vergleiche Abschnitt 3.1 und [44]. [2]

Abbildung 5.8 visualisiert das im Folgenden erläuterte Verfahren. Um die Objekt-Information während der Bildsynthese zu erhalten, wird der vollständige, dem Bild korrespondierende Gesamtzustand in der virtuellen Umfeldsimulation vor der Bildsynthese abgegriffen und mit einem eindeutigen Identifikator (ID) versehen. Dieser Identifikator repräsentiert die gesamte Menge aller Objektzustände der Umfeldsimulation und ergänzt diese als weiteren Parameter $(\mathbf{O}, ID)_{k,VU}$. Das korrespondierende Datenpaar wird dem HiL-Simulator zugeführt und für eine spätere Zuordnung gespeichert. [2]

Der Identifikator wird zusätzlich im Sensormodell der Bildgenerierung in einen festgelegten Pixel des zugehörigen Bildes kodiert. Das um Synchronisationsinformation angereicherte Bild wird anschließend, wie in der Bildateneinspeise-Methode üblich, an die Fahrerassistenzkamera übermittelt und dort in den emulierten Bildsensor geschrieben. Beim

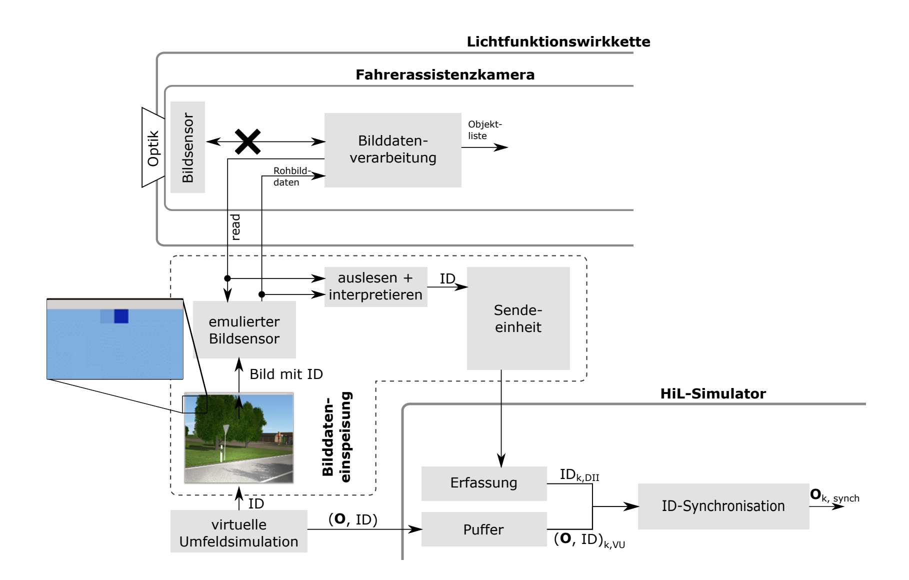


Abbildung 5.8.: Logische Architektur zur Erfassung der Objektzuständen am HiL-Simulator während der Einspeisung in die Fahrerassistenzkamera, vergleiche [2]

Senden des Bildes aus dem emulierten Sensor wird der Pixel dekodiert und über eine zusätzlich einzurichtende echtzeitfähige Verbindung direkt an den HiL-Simulator übermittelt. [2]

Der Identifikator kann bei dieser Methode auch außerhalb des sichtbaren Bildes kodiert werden.

Im HiL-Simulator wird der Identifikator als $ID_{k,DII}$ erfasst und nachgelagert um die zugehörigen Objektzuständen ergänzt. Mit Hilfe dieser Methode liegen Objektzustand und Zeitpunkt der eingespeisten Bilddaten vor und können als synchronisierte Daten $\mathbf{O}_{k,synch}$ zur Bewertung des Systems verwendet werden. [2]

5.2.4 Methode zur Synchronisation der Ausgangsdaten der Lichtfunktion

Unter der Annahme, dass der Scheinwerfer lediglich eine verzögerte Umsetzung der Steuersignale darstellt, kann das erfasste Bussignal um Δt_2 verschoben werden, vergleiche Abbildung 5.7.

Die synchronisierte Messung wird im Folgenden als $LV_{k,synch} = LV_{Bus}(t_k + \Delta t_2)$ bezeichnet. Folglich ist es notwendig, die Datenverarbeitungszeit des Scheinwerfers empirisch oder über eine formale Analyse zu ermitteln. Unterliegt diese Umsetzungszeit des Scheinwerfers Schwankungen, so müssen diese als Unsicherheitskriterium in den Metriken berücksichtigt werden. Da die Lichtfunktion bei auftretenden Schwankungen für alle möglichen Datenverarbeitungszeiten des Scheinwerfers korrekte Lichtverteilungen bestimmen muss, kann beispielsweise im Fall der Evaluierung der Ausblendfunktion diese Schwankung auch als Ortsunschärfe der Referenzobjekte interpretiert werden, vergleiche Abschnitt 5.3.3. [2]

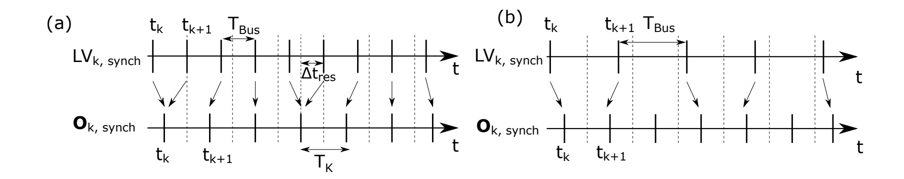


Abbildung 5.9.: Zuordnung der Lichtverteilungen am Scheinwerfer zu den zeitlich nächsten Objektzuständen der Kamera, für $f_{Bus} > f_K$ (a) und $f_{Bus} < f_K$ (b), vergleiche [2]

5.2.5 Zusammenführung der Daten

Da beide Datenströme $\mathbf{O}_{k,synch}$ und $LV_{k,synch}$ in unterschiedlichen Frequenzen vorliegen, müssen entsprechende Ein- und Ausgangspaare durch Zuordnung gefunden werden, vergleiche Abbildung 5.7.

Die Zuordnung der Daten-Paare erfolgt mit dem *Nächste-Nachbarn-Verfahren*[1] auf Grundlage der kleinsten Zeitdifferenz, siehe Abbildung 5.9. Diese werden im Folgenden als Daten-Tupel $(\mathbf{O}, LV, \Delta t_{res})_{k,synch}$ bezeichnet.

Ist die Frequenz des Fahrzeugbusses f_{Bus} größer als die Frequenz der Kamera f_K, so kommt es mit dieser Methode zur regelmäßigen doppelten Zuordnung von Kamerazuständen zu Lichtverteilungen. Ist hingegen die Frequenz der Kamera größer, so findet nicht jeder erfasste Kamerazustand Verwendung. Beide Fälle führen zu einem zusätzlichen zeitlichen Fehler von maximal der halben Zeitkonstante T_K die aus der Kamerafrequenz resultiert. [2]

Der durch diese Zuordnung verbleibende Zeitfehler Δt_{res} entspricht der Differenz der Zeitbasen und vergrößert die Unsicherheit über die Datenlaufzeit im Gesamtsystem. Da die Latenz in diesem Fall bekannt ist, kann sie nachfolgend beispielsweise durch eine Interpolation zwischen zwei

[1] engl. Nearest-Neighbor-Algorithm

aufeinanderfolgenden Zuständen $\mathbf{O}_k$ und $\mathbf{O}_{k+1}$ kompensiert werden. Ebenso ist es möglich Δt_{res} zu verkleinern, indem die Berechnungsfrequenz der Umfeldsimulation deutlich erhöht wird, so dass zwischen den Berechnungen für das Rendering zusätzliche Objektzustände an den Echtzeitrechner übertragen werden. [2]

5.3 METRIKEN FÜR PIXELBASIERTE LICHTFUNKTIONEN

In diesem Abschnitt werden die Überprüfung von zwei wesentlichen Lichtfunktionsklassen durch Metriken betrachtet: Die Bewertung adaptiver Lichtfunktionen mit induziertem Zustandswechsel sowie die Bewertung dynamischer kamerabasierter Lichtfunktionen durch geometrisch basierte Metriken am Beispiel der Ausblendfunktion.

Weiterhin wird in diesem Abschnitt eine Methode zur Kompensation verbliebener zeitlicher Unsicherheiten in der Synchronisation am HiL-Testsystem aufgezeigt.

5.3.1 BEWERTUNG ADAPTIVER LICHTFUNKTIONEN

Adaptive Lichtfunktionen setzen sich aus einer Menge an statischen situativen Helligkeitsmatrizen zusammen, die über Kurvenlicht und LWR digital verschoben werden können, vergleiche Abschnitt 2.2.2. Zustandswechsel funktionieren nach dem in Abbildung 5.10 aufgezeigten Prinzip. Die Lichtfunktion, oder ein Pixelelement der Lichtfunktion, wird durch eine Aktion (ACT) von einem vorherrschenden (PRE) in einen nachfolgenden Zustand (ER) überführt.

Die Aktion kann beispielsweise eine Geschwindigkeitsschwelle oder ein navigationsbasierter Wechsel der AFS-Lichtverteilung darstellen. Der

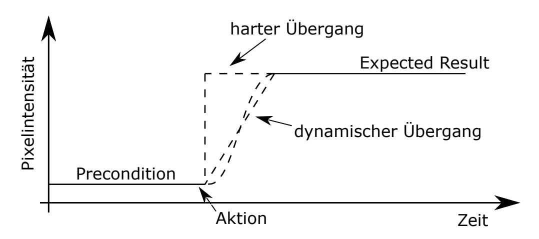


Abbildung 5.10.: Prinzip von Zustandswechsel in Lichtfunktionen mit und ohne dynamischen Übergang

Übergang erfolgt in diskreten Schritten und kann dabei hart oder weich gestaltet werden. Die Parametrierung stellt, neben der Definition der Helligkeit der Lichtpixel der gesamten statischen Lichtverteilung, einen Teil des Applikationsprozesses dar.

Zum Test von statischen Zuständen eignen sich pixelweise Soll-Ist-Vergleiche. Die Indikatorfunktion f_n kann dabei nach der Differenz jeden Lichtpixel n auf folgende vereinfachende Zustände abbilden:

$$f_n \left(LV_{soll} - LV_{ist} \right) = \begin{cases} 0 & LV_{soll} \text{ für Pixel n identisch zu } LV_{ist} \\ 1 & LV_{soll} \text{ für Pixel n nicht identisch zu } LV_{ist} \end{cases} \tag{5.1}$$

wobei Zustand 1 den jeweiligen Fehlerfall darstellt. Ein eindimensionaler KPI ist beispielsweise durch die Anwendung der 1-Norm über alle Pixel

$$\| \left(f_1, ..., f_n \right) \|_1 = \sum_{i=1}^{n} |f_i| \tag{5.2}$$

gegeben. Der erhaltene Wert entspricht dabei der Anzahl der fehlerhaften Pixel in einer Lichtverteilung zum erfassten Zeitpunkt. Für den Fall einer virtuellen Bildverschiebung, wie dem digitalen Kurvenlicht, wird das Soll-Bild entsprechend der Soll-Verschiebung, die beispielsweise

aus dem Lenkwinkel resultieren kann, und der vorliegenden Klasse der Lichtfunktion prädiziert. Hierfür ist in Gleichung 5.1 mit einer Toleranzschwelle auf die vereinfachenden Zustände abzubilden.

Dynamische Übergänge lassen sich mit Hilfe von Regressionsmethoden unter Beachtung des *Nyquist-Shannon*-Abtasttheorems ermitteln und mit hinterlegten Kennlinien vergleichen. Dabei erfolgt die Bewertung mit einer von Funktionsexperten definierten Toleranzgrenze um die Kennlinie.

Die Bewertung des dynamischen Kurvenlichts kann auch auf geometrisch abgeleitete KPIs zurückgeführt werden. Beispielsweise kann die erreichte Überdeckung von Lichtverteilung und Straßengeometrie als Kriterium berechnet und optimiert werden. Die Straßengeometrie liegt dem Testsystem durch die VU vor. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht explizit ausgearbeitet.

5.3.2 BEWERTUNG DER AUSBLENDFUNKTION

Assistierende Lichtfunktionen, wie beispielsweise die Ausblendfunktion, Schildentblendung, Führungslinien oder Abstandsmarkierungen, basieren auf einer Scheinwerfer-Aktion, die zu einer kamerabasiert detektierten Position eines Objekts im Straßenverkehr korrespondiert, vergleiche Abschnitt 2.2.2.

Abbildung 5.11 illustriert die logische Architektur zur Verifikation dieser Funktionen auf Basis der synchronisierten Daten-Tupel $(\mathbf{O}, LV)_{k,synch}$. Nach der Anwendung der Methode zur Objektvergrößerung und Kompensation der schwankenden Scheinwerferzeit, vergleiche Abschnitt 5.3.3, erfolgt zunächst die Transformation der Umfeldobjekte in beide Scheinwerferkoordinatensysteme. Der Basiswechsel wird durch die

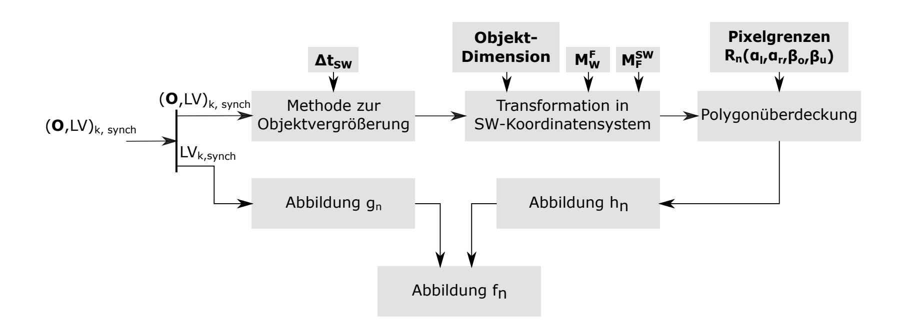


Abbildung 5.11.: Progammablauf zur Überprüfung der korrekten Ausblendung auf Basis der synchronisierten Bild- und Lichtfunktionsdaten, vergleiche [2]

Abbildungsmatrizen $\mathbf{M}_W^F$ für Welt zu Fahrzeug sowie $\mathbf{M}_W^{SW}$ für Fahrzeug zu Scheinwerfer beschrieben. Anschließend werden die Scheinwerferpixel bestimmt, die das Objekt im Straßenverkehr geometrisch überlagern. Dies ist beispielsweise durch das *Punkt-in-Polygon-* oder *Polygon-Überdeckungs-Verfahren* durchführbar, vergleiche [89]. [2]

Für diese Vorgehensweise ist das Wissen über die Anbaupositionen und Orientierung von Scheinwerfer und Kamerasystem im Fahrzeugkoordinatensystem notwendig. Freiheitsgrade sind in dieser Methode die gewählten Objektdimension (Höhe, Breite, Tiefe) sowie die geometrische Abstrahlcharakteristik $R_n(\alpha_l, \alpha_r, \beta_o, \beta_u)$ jedes Lichtpixels.

Zur Auswahl der Fahrzeuggröße sind, je nach zu erzielender Testaussage, unterschiedliche Strategien anwendbar. Werden die in der Umfeldsimulation implementierten Verkehrsobjekte auf Basis von CAD-Daten implementiert, kann aus bekannter Objektposition auf beliebige Referenzpunkte zurückgerechnet werden. Mögliche Varianten sind zum Beispiel:

- Die Objektgröße wird als Umhüllende des Gesamtfahrzeugs betrachtet und umfasst auch die Außenspiegel.

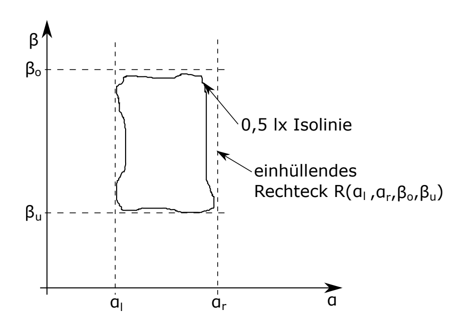


Abbildung 5.12.: Einhüllendes Rechteck zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Abstrahlcharakteristik eine Scheinwerfer-LED-Pixels auf Basis der 0,5 lx Isolinie in 25 m Entfernung, nach [89]

- Die Objektgröße bezieht sich analog zur Detektionsmethode der Fahrerassistenzkamera beispielsweise auf die Position der Scheinwerfer- und Rückleuchten der Verkehrsobjekte.
- Die Objektgröße und Position kann auch auf die Position der Windschutzscheibe oder andere Referenzzonen bezogen werden.

Die Abstrahlcharakteristik der Lichtpixel ist in pixelbasierten Lichtfunktionen als Datensatz hinterlegt und können als horizontale und vertikale Winkel gegeben sein, vergleiche Abbildung 5.12. Diese können, für eine Testdurchführung basierend auf den selben Annahmen wie in der Lichtfunktionsapplikation festgelegt, für den Programmablauf herangezogen werden. [2]

Um eine direkte Bewertung zu ermöglichen, werden die Dimmstufen der einzelnen Lichtpixel der Lichtfunktion durch die Indikatorfunktion g_n und die ermittelten überdeckenden Scheinwerferpixel durch die Indikatorfunktion h_n für jeden Lichtpixel n vereinfacht:

$$g_n = \begin{cases} 0 & \text{Pixel n aus} \\ 1 & \text{Pixel n an} \end{cases} \tag{5.3}$$

$$h_n = \begin{cases} 0 & \text{Pixel n trifft kein Objekt} \\ 1 & \text{Pixel n trifft Objekt} \end{cases} \tag{5.4}$$

Schließlich werden diese durch f_n auf folgende detailierte Zustände abgebildet [2]:

$$f_n = 2 \cdot g_n + h_n = \begin{cases} 0 & \text{Pixel n aus, trifft kein Objekt} \\ 1 & \text{Pixel n aus, trifft Objekt} \\ 2 & \text{Pixel n an, trifft kein Objekt} \\ 3 & \text{Pixel n an, trifft Objekt} \end{cases} \tag{5.5}$$

Dabei stellt Zustand 3 den einzigen Fehlerfall dar und führt, je nach gewählter Objektdimension, zu einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Mit der vorgestellten Methode lässt sich eine differenzierte Bewertung der Lichtfunktion auch in dynamischen und komplexen Verkehrsszenen durchführen. Es ist sowohl die visuelle Auswertung für den Tester als auch eine automatisierte Auswertung durchführbar. [2]

Ist zudem ein eindimensionaler KPI der Anzahl der Pixel erforderlich, die einen Fehlerfall darstellen, kann folgende logische Verknüpfung angewandt werden:

$$\tilde{f}_n = g_n \wedge h_n \tag{5.6}$$

Der KPI ist anschließend durch die Anwendung der 1-Norm über alle Pixel $\| (\tilde{f}_1, ..., \tilde{f}_n) \|_1$ gegeben.

5.3.3 METHODE ZUR KOMPENSATION VON SCHWANKENDEN SCHEINWERFERSYSTEMZEITEN

Die angenommene zeitliche Schwankung der Scheinwerfersystemzeit $\Delta\, t_{SW}$ führt zu einer Unsicherheit in der Synchronisation in (maximaler) positiver und (minimaler) negativer Zeitrichtung um eine angenommene mittlere Systemzeit $\tilde{t}_{SW}$, vergleiche Abschnitt 5.2.4.

Neben der Möglichkeit, eine zeitliche Best-Case- und Worst-Case-Betrachtung der Ausblendungsmetrik zu jedem Zeitschritt durchzuführen, können die Schwankungen als eine Ortsunschärfe der Objekte in der Umfeldsimulation interpretiert werden [2].

Werden die Objekte im Scheinwerferkoordinatensystem betrachtet, so führt eine Gesamtunsicherheit von $\pm\Delta\, t_{SW}$ zu einer Winkelunschärfe der Koordinaten der horizontalen $\pm\Delta\,\alpha$ und vertikalen Objektpositionen $\pm\Delta\,\beta$ eines beliebigen detektierten Punktes (α, β), vergleiche Abschnitt 2.2.2.

Für eine virtuelle Objektvergrößerung können die Relativdistanzen x_{SW}, y_{SW}, z_{SW} und die Relativgeschwindigkeit $\dot{x}_{SW}$, $\dot{y}_{SW}$, $\dot{z}_{SW}$ in kartesischen Koordinaten entsprechend der Unsicherheit linear interpoliert werden:

$$\Delta\alpha_{+,-} \approx \tan^{-1}\left(\frac{y_{SW} + (\dot{y}_{SW} \cdot \pm\Delta\, t_{SW})}{x_{SW} + (\dot{x}_{SW} \cdot \pm\Delta\, t_{SW})}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_{SW}}{x_{SW}}\right) \tag{5.7}$$

$$\Delta\beta_{+,-} \approx \tan^{-1}\left(\frac{z_{SW} + (\dot{z}_{SW} \cdot \pm\Delta\, t_{SW})}{x_{SW} + (\dot{x}_{SW} \cdot \pm\Delta\, t_{SW})}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{z_{SW}}{x_{SW}}\right) \tag{5.8}$$

Wie in Abbildung 5.13 veranschaulicht, lassen sich durch die Bestimmung der Unschärfe die detektierten und ermittelten Objektpunkte i zu einer neuen virtuellen Objektgröße $(\alpha_-, \alpha_+, \beta_-, \beta_+)$ zusammenfassen:

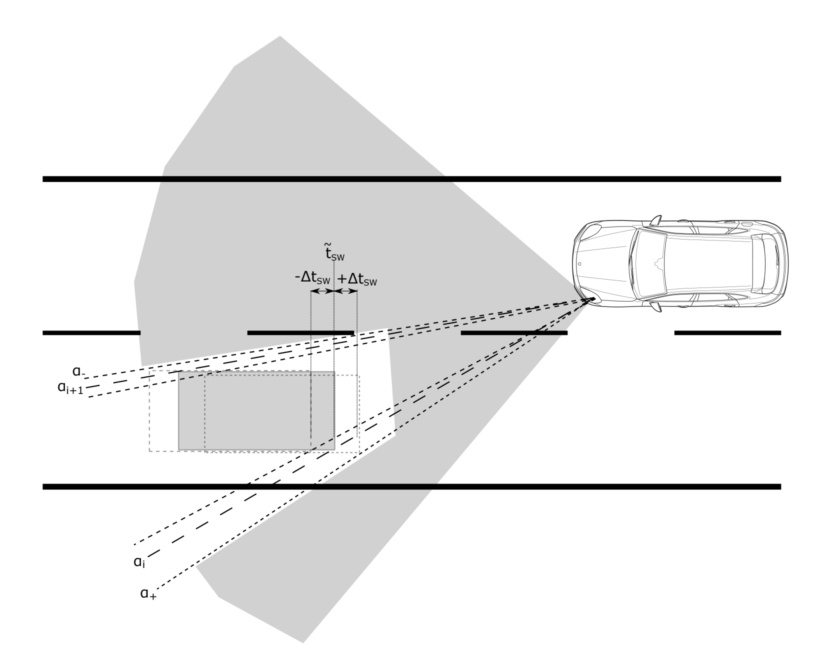


Abbildung 5.13.: Interpretation der schwankenden Scheinwerfersystemzeit als Objektunschärfe mit der Folge einer zunehmenden Objektgröße

$$\alpha_- = \min_i (\alpha_i + \Delta\alpha_{i,-}) \tag{5.9}$$

$$\alpha_+ = \max_i (\alpha_i + \Delta\alpha_{i,+}) \tag{5.10}$$

$$\beta_- = \min_i (\beta_i + \Delta\beta_{i,-}) \tag{5.11}$$

$$\beta_+ = \max_i (\beta_i + \Delta\beta_{i,+}) \tag{5.12}$$

5.4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Im Folgenden werden die entwickelten Konzepte an einem bestehenden HiL-Testsystem eines prototypischen Vorserienstands eines Cayenne (Typ E3) integriert. Die Umsetzung, praktische Anwendung und Evaluation der Methoden erfolgt anhand der Lichtfunktion eines 84-Pixel-Matrixscheinwerfers in einer zentralen Systemarchitektur.

5.4.1 PROTOTYPISCHE UMSETZUNG

Als Grundlage der experimentellen Untersuchungen dient ein HiL-Testsystem für Fahrerassistenzsysteme. In das HiL-Testsystem werden die vorgestellten Methoden der Synchronisation und die Bewertungsmethodiken für den Test von pixelbasierten Lichtfunktionen implementiert, vergleiche Abbildung 5.14.

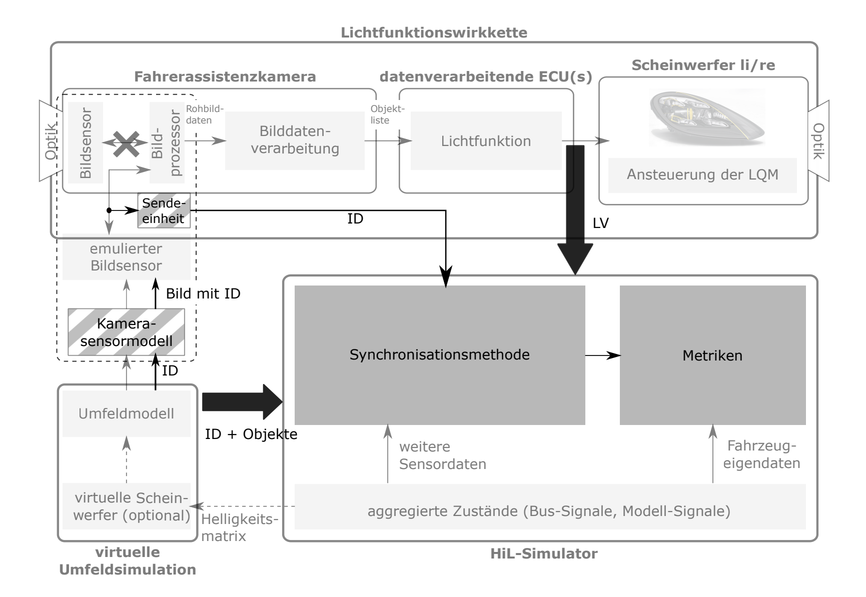


Abbildung 5.14.: Gesamtarchitektur des bestehenden HiL-Testsytems (hell) mit vorgenommenen Erweiterungen (dunkel) und Modifikationen (schraffiert)

Für Kennzahlen und Datenblätter der verwendeten *Scalexio* HiL-Simulatoren und der *Trentino* Bilddateneinspeisung sei auf Anhang A.1 verwiesen.

Die vorgestellten Synchronisationsmethoden und Metriken werden prototypisch und ohne Beschränkung der Allgemeinheit für jeweils ein einzelnes Verkehrsobjekt mit *Matlab/Simulink* umgesetzt.

Nachfolgende Untersuchungen basieren auf der Umfeldsimulation *Virtual Test Drive 1.4.3* der MSC.SOFTWARE GMBH. In diesem Aufbau wird auf die Umsetzung und Bewertung anhand visualisierter Scheinwerfer verzichtet und Rückkopplungen des Scheinwerfers über die Fahrerassistenzkamera sind nicht Gegenstand der Untersuchungen. Als direkte Verbindung zwischen Umfeldsimulation und HiL-Simulator wird der VTD

Runtime-Data-Bus (RDB) verwendet, der Objektdaten und zugehörige ID zur Verfügung stellt. Für die Evaluierung werden Fahrzeugmodelle mit bekannten Dimensionen und Referenzpunkten verwendet. Das Umfeldmodell von VTD wird mit einer festen Frequenz von $f_{VU} = 100\,\mathrm{Hz}$ betrieben.

UMSETZUNG DER KAMERASYNCHRONISATION

Der Identifikator zur Synchronisation der Bilddateneinspeisung wird in der ersten Bildzeile auf drei 8 bit Blöcke eines festgelegten RGB-Bildpixels aufgeteilt und in Form einer modifizierten Bilddatengenerierung umgesetzt, vergleiche Abbildung 5.15, vergleiche [2].

Die ID wird im Bildeinspeiseadapter nach folgender Formel wieder aus den Bildpixeln dekodiert:

$$ID = R + 2^8 \cdot G + 2^{16} \cdot B \tag{5.13}$$

Damit sind insgesamt 24 Bit Daten übertragbar was etwa $16,8 \cdot 10^6$ möglichen IDs bis zu einem Zählerüberlauf entspricht.

Diese Pixel bleiben durch das nachfolgende Sensormodell von Bildmanipulationen unangetastet und die Bildzeile wird der Auswertung zugeführt.

Für die Erweiterung um eine direkte Verbindung zum HiL-Simulator wird eine bisher nur als Entwicklerzugang genutzte UART[2]-Schnittstelle der *Trentino* Bilddateneinspeisung eingebunden, vergleiche [2]. Die IDs werden mit einem UART-Rahmen[3] fester Größe gesendet, der jeweils

[2] kurz für Universal-Asynchronous-Receiver-Transmitter
[3] engl. frames (pl.)

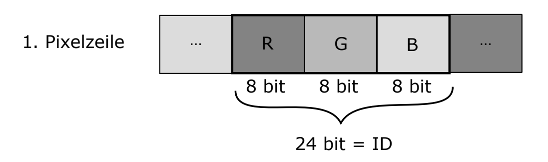


Abbildung 5.15.: Kodierung der *ID* aufgeteilt auf einen RGB-Bildpixel der ersten Bildzeile in der Bildsynthese

eine *ID* als Nutzdaten[4] enthält. Die gewählte Symbolrate beträgt dabei 230, 4 kBd.

AUSGEWÄHLTE TESTSZENARIEN

Für die nachfolgenden Untersuchungen werden drei Testszenarien implementiert:

(1) Ein geschwindigkeitsbasierter Zustandswechsel der Lichtfunktion.

(2) Die Ausblendung eines vorausfahrenden Fahrzeuges.

(3) Die Ausblendung eines entgegenkommenden Fahrzeuges.

Die Durchführung der Szenarien (2) und (3) für die Ausblendfunktion erfolgt dabei in Anlehnung an in der UN-ECE 123 [36] definierte Manöver und werden auf einer mehrspurigen Teststrecke für Rechtsverkehr umgesetzt, vergleiche Abbildung 5.16. Die maximale Relativdistanz der Objekte beträgt dabei mindestens 200 m. Die jeweiligen Fahrzeuggeschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie die daraus resultierenden

[4] engl. payload

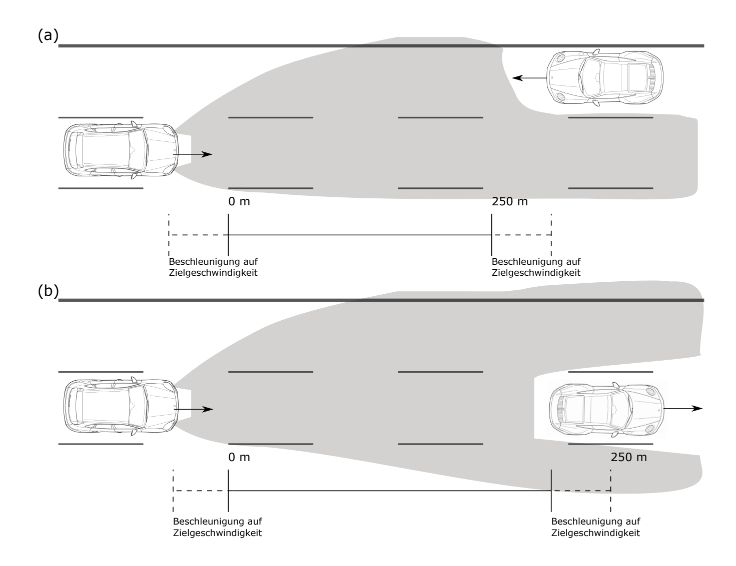


Abbildung 5.16.: Testszenario für (a) ein entgegenkommendes Fahrzeug und (b) ein vorausfahrendes Fahrzeug

Relativgeschwindigkeiten sind im konkreten Durchlauf frei wählbar und werden für die Messdurchführung zufällig ausgewählt. Es ergeben sich je Szene zehn Realisierungen von unterschiedlicher Testdauer auf welche die nachfolgende Evaluation angewandt wird.

5.4.2 Überwachung und Evaluierung der Sensoreinspeisung

Die Validität von modellierten Komponenten und Sensoren spielt in HiL-Testsystemen eine zentrale Rolle und hat unmittelbar Einfluss auf die Aussagekraft der Testergebnisse. In der vorgestellten HiL-Architektur ist vor allem eine korrekte Funktion der Fahrerassistenzkamera entscheidend. Daher wird nachfolgend eine Methode implementiert, die diese im Testbetrieb überwacht.

Obwohl die Stimulation der Kamera mit Hilfe von idealen Bilddaten vorgenommen wird, können Fehlklassifikationen nicht ausgeschlossen werden. Um bei beobachteten Fehlern im Verhalten der Lichtfunktion auf die korrekte Fehlerursache rückzuschließen und ein ideales Kameraverhalten sicherzustellen, ist die Überwachung der Bildverarbeitungseinheit notwendig.

Die klassifizierten Objektdaten werden dazu nach der Bildverarbeitungseinheit über den Fahrzeugbus oder steuergeräteinterne Signale im HiL-Simulator erfasst und mit den synchronisierten idealen Objektdaten aus dem HiL-Simulator abgeglichen. Als Bewertungskriterium eignet sich der Quotient aus der idealen Objektposition des Umfeldmodells und den Bildverarbeitungsdaten. Eine Robustheit des Gütemerkmals gegenüber der Division durch Null kann über die Addition einer Konstante $\epsilon << 1$ im Nenner erreicht werden. Die folgende Gleichung stellt dies beispielhaft für die Relativdistanz x_K im Kamerakoordinatensystem dar:

$$\frac{x_{K,Bus}}{x_{K,VU} + \epsilon} - 1 = \begin{cases} \sim 0 & \text{Plausible Klassifikation von Objekt} \\ else & \text{Fehlklassifikation} \end{cases} \tag{5.14}$$

Diese Metrik ist direkt auf weitere Kenngrößen der Kameraklassifikation wie beispielsweise die Objektbreite übertragbar. Ideale Voraussetzung zur Nutzung dieser Methode ist ein möglicher Rückschluss auf die vergangene Zeitspanne zwischen Bilderfassung und erfasstem Bussignal über der Objektliste angehängte Zeitstempel. Die Bewertung erfolgt anhand einer von Funktionsexperten definierten Toleranzgrenze.

Fehlklassifikationen oder Fehlverhalten der Kamera am HiL-Simulator sind nicht unbedingt übertragbar auf die Performance der Kamera unter Realbedingungen. Zum Test der Wahrnehmungseinheit als Komponente kommen üblicherweise aufgezeichnete Bilddaten in SiL-Resimulationen zum Einsatz, vergleiche Abschnitt 2.1.2.

5.4.3 EVALUIERUNG DER SYNCHRONISATIONSMETHODE

In diesem Abschnitt wird die Anwendung der Synchronisationsmethode am umgesetzten System evaluiert. Dazu wird die Gesamtlatenz $\Delta\, t_{ges}$ im integrierten System bestimmt, welche durch die in diesem Kapitel vorgestellte Synchronisationsmethode behoben wird. Abschließend wird die Genauigkeit der Synchronisation diskutiert und Vorteile und Limitierungen des entwickelten Ansatzes aufgezeigt.

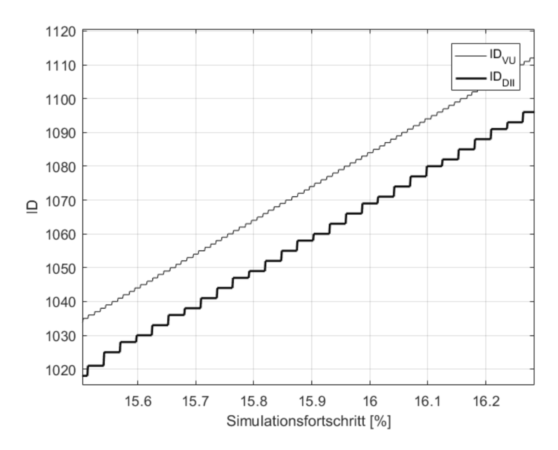


Abbildung 5.17.: Ausschnitt aus einer Messung beider *IDs* der Bildeinspeisesynchronisation im HiL-Simulator

ERMITTLUNG DER DATENVERARBEITUNGSZEIT DER BILDDATEN-EINSPEISUNG

Für die definierten Testszenarien werden Aufzeichnungen der Signale des HiL-Simulators im Testbetrieb durchgeführt und analysiert. Abbildung 5.17 zeigt den Ausschnitt einer Messung der IDs von Umfeldsimulation ($ID_{k,VU}$) und Bilddateneinspeisung ($ID_{k,DII}$). Zu erkennen ist der inkrementelle Anstieg beider Größen über die Zeit. Die Latenz der Bilddateneinspeisung gegenüber der direkten Übertragung der Objektdaten aus der Umfeldsimulation entspricht Δt_1.

$\Delta\, t_1$ schwankt im zeitlichen Verlauf, da in den Datenverarbeitungsketten von Umfeldsimulation, Bildsynthese, Bildeinspeisemethode und Fahrerassistenzkamera asynchrone Datenströme üblicherweise mittels Datenpuffer synchronisiert werden, vergleiche Abschnitt 5.2.1. Die im Gesamtsystem resultierende Latenz $\Delta\, t_{ges}$ wird in nachfolgenden Abschnitten bestimmt und aufgezeigt.

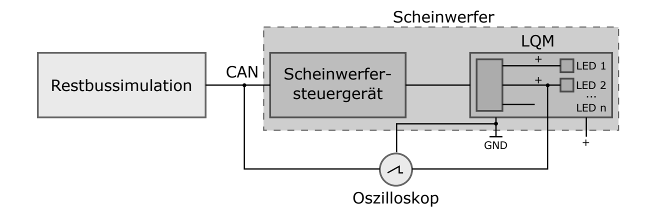


Abbildung 5.18.: Aufbau zur Messung der Datenverarbeitungszeit eines prototypischen 84-Pixel LED-Scheinwerfers

ERMITTLUNG DER DATENVERARBEITUNGSZEIT UND -SCHWANKUNG DES SCHEINWERFERS

Für die empirische Messung der mittleren Datenverarbeitungszeit $\tilde{t}_{SW}$ und -schwankung $\pm\,\Delta\, t_{SW}$ eines prototypischen 84-Pixel Entwicklungsmusters wird das System Scheinwerfer mit Scheinwerfersteuergerät und LQM betrachtet, vergleiche Abschnitt 2.2. Dieses wird über eine Restbussimulation mit einem definierten Helligkeitsmatrizenverlauf bespielt.

Abbildung 5.18 zeigt den Versuchsaufbau mit einem CAN-fähigen Oszilloskop. Dabei wurde der CAN-Bus sowie die korrespondierende Pulsweitenmodulation einzelner LEDs des LQM erfasst. Für weitere technische Informationen zum verwendeten Oszilloskop der KEYSIGHT TECHNOLOGIES, INC. sei auf Anhang A.1 verwiesen.

Ausgewertet wird, wie in Abbildung 5.19 anhand einer Beispielmessung veranschaulicht, die Zeitdifferenz zwischen der Änderung eines CAN-Signalwertes und der korrespondierenden PWM Änderung der entsprechenden LED in Ausblendsituationen. Das Oszilloskop zeichnet die Messung, bei eintretender Änderung in einer definierten CAN-Botschaft, automatisiert um die Triggerbedingung bei $t \approx 0\,\mathrm{ms}$ auf.

Anhand dieser Messmethode werden die minimale und maximale Umsetzungszeit des Scheinwerfers ermittelt. Durch eine formale Analyse

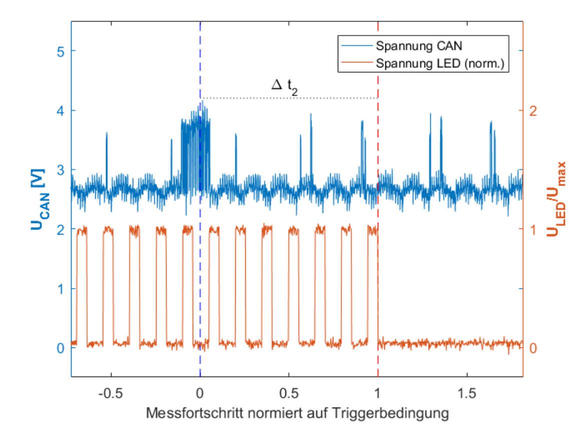


Abbildung 5.19.: Auswertemethodik zur Ermittlung Datenverarbeitungszeit des Scheinwerfers mit getriggerter CAN-Botschaft und Änderung der korrespondierenden PWM

beim Scheinwerferlieferanten werden die Werte plausibilisiert und können in den nachfolgenden Untersuchungen angewandt werden.

Zu beachten ist, dass diese Messung oder die Durchführung der formalen Analyse stets für jeden Scheinwerfertyp wiederholt werden muss und eine Übertragbarkeit auf neue oder modifizierte Scheinwerfersysteme nur bedingt möglich ist. [2]

ERMITTLUNG DES ELIMINIERTEN ZEITLICHEN GESAMTFEHLERS

Anhand der vorangegangen Messung kann nun der zeitliche Gesamtfehler $\Delta t_{ges} = \Delta t_1 - \tilde{t}_{SW}$ ermittelt werden, der durch die Synchronisationsmethode eliminiert wird. Abbildung 5.20 visualisiert den zeitlichen Verlauf und die Schwankung über eine Testszene hinweg. Zu erkennen ist die Schwankung der unterschiedlichen Teilsysteme, die sich als Schwebung der unterschiedlichen Datenfrequenzen darstellt.

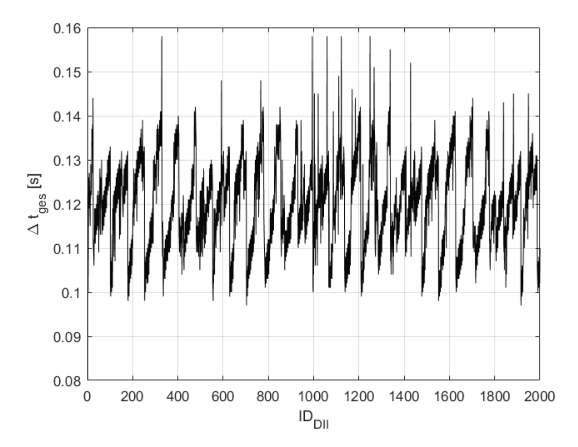


Abbildung 5.20.: Messung des zeitlichen Gesamtfehlers Δt_{ges} in einer Testszene der durch die Synchronisation eliminiert wird

Der Median über den Messungen des vorgestellten Versuchsaufbaus beträgt $\Delta t_{ges} = 120\,\text{ms}$ mit einer mittleren absoluten Abweichung (MAD[5]) von $36,5\,\text{ms}$. Nach der in Abschnitt 5.2.1 durchgeführten Betrachtung über die Auswirkungen unterschiedlicher Latenzen sind in dieser Testarchitektur keine zeitkritischen Evaluationen ohne Synchronisationsmethode möglich.

GENAUIGKEIT DER SYNCHRONISATIONSMETHODE

Zur Bewertung der Synchronisationsmethode und um die Verbesserung durch die Methodik gegenüber dem Stand der Technik zu ermitteln, werden im folgenden zwei Aspekte evaluiert: Die Genauigkeit der Datenerfassung im HiL-Simulator sowie die Größenordnung und Auswirkung

[5] Kurzform für median absolute deviation (engl.)

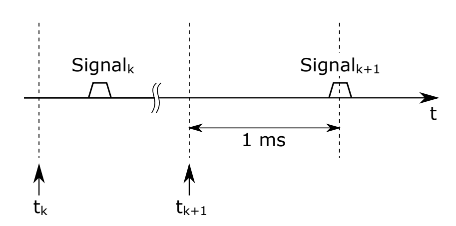


Abbildung 5.21.: Definition der Zeitstempel der Signale bei festen 1 ms-Zeitscheiben des HiL-Simulators

verbleibender Zeitfehler.

Die Zeitbasis der *ID* der Bilddateneinspeisung und des Fahrzeugbusses ist die wesentliche Basis der Synchronisationsmethode. Wie in Abbildung 5.21 dargestellt, wird der für die Synchronisationsmethode essentielle Zeitstempel t_k in allen erfassten Daten der Zeitscheibe der ersten Flanke jedes Signals zugeordnet. Der maximale zeitliche Fehler dieser Methode der Messdatenerfassung beträgt folglich -1 ms.

Die Datenerfassung der *ID* durchläuft vor der Erfassung am HiL noch die Datenverarbeitung des Bildeinspeiseadapters. Unter Vernachlässigung der Datenlaufzeit auf den Übertragungswegen im Nanosekundenbereich hängt die Genauigkeit der hiermit erfassten Daten maßgeblich von dieser Verarbeitungszeit ab. Die gesamte Datenverarbeitungszeit im Bildeinspeiseadapter liegt im Bereich $\sim 1\,\mu s$, weshalb der gesamte Übertragungsvorgang echtzeitfähig innerhalb des gewählten Millisekunden-Takts stattfindet, vergleiche Abschnitt 5.4.1. [2]

Abbildung 5.22 zeigt die Ein- und Ausgangsdaten der Lichtfunktionswirkkette und die verbleibende zeitliche Abweichung der Zeitstempel nach der Zuordnung. Die Winkelhalbierende entspricht einer Zuordnung ohne zeitlicher Abweichung. Die vertikalen Balken jedes Datenpunktes stellen die zeitliche Spanne der Scheinwerfersystemzeit dar. Die

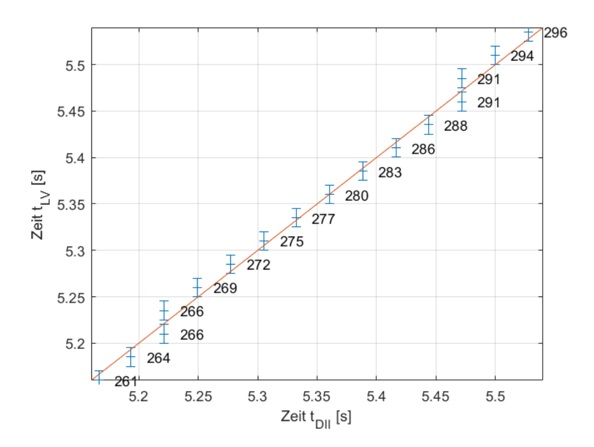


Abbildung 5.22.: Verbleibende zeitliche Differenzen Δt_{res} nach Anwendung der Synchronisationsmethode, aufgezeigt mit zugehörigen IDs der Umfeldsimulation und horizontal aufgetragener Systemzeit Δt_2

in Abschnitt 5.2.5 prognostizierte regelmäßige doppelte Zuordnung von Lichtverteilungen zu Umfeldzuständen (IDs) ist ebenfalls zu erkennen.

Die Differenz der Winkelhalbierenden zu den Messpunkten entspricht dem verbleibenden Zeitfehler Δt_{res} nach der Synchronisation. Diese beträgt in den durchgeführten Messungen im Median 2,5 ms mit einem MAD von 7,9 ms. Das Maximum beträgt dabei 25,1 ms.

Mittels linearer Interpolation des Umfeldzustands lässt sich das jeweils ermittelte Δt_s eliminieren, vergleiche Abschnitt 5.2.5. Der nach der Interpolation verbleibende maximale Fehler lässt sich durch die LAGRANGE-Form des Restglieds abschätzen. Für das Restglied R_l, dem Entwicklungspunkt t_0 und der Bahnkurve $x(t)$, ergibt sich mit angenommener maximaler Beschleunigung $\ddot{x} = 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ und der ermittelten maximalen Abweichung ein maximaler abzuschätzender Fehler von

$$R_l(t,t_0) \leq \frac{|x^{l+1}(t_0)|}{(n+1)!} \cdot |(t-t_0)^{l+1}| \qquad l = 1 \tag{5.15}$$

$$= \frac{10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}{2} \cdot (25{,}1\,\mathrm{ms})^2 \tag{5.16}$$

$$\approx 0{,}00315\,\mathrm{m} \tag{5.17}$$

Abweichungen in der Größenordnung von 10^{-3} m werden für die Evaluierung als vernachlässigbar angenommen.

Die vorgestellte Objektvergrößerungsmethode zur Kompensation der schwankenden Scheinwerfersystemzeit basiert in dieser Arbeit ebenfalls auf einer linearen Interpolation. Unter den selben Randbedingungen für eine Restgliedabschätzung und der Tatsache, dass die Schwankung im untersuchten Scheinwerferprototypen $\Delta t_{SW} < 25{,}1$ ms beträgt, kann die Abweichung ebenfalls als vernachlässigbar angenommen werden.

5.4.4 Anwendung der Bewertungsmetriken

Auf Grundlage des implementierten HiL-Testsystems können Metriken für adaptive und kamerabasierte Lichtfunktionen evaluiert werden. Die Anwendung der entwickelten Methoden wird im Folgenden aufgezeigt.

Metriken zur Bewertung adaptiver Lichtfunktionen

Abbildung 5.23 visualisiert anhand eines Auszugs einer Messung die Metrik für einen geschwindigkeitsbasierten Zustandswechsels mit dynamischen Zustandsübergang, vergleiche Abschnitt 5.3.1. In der Grafik

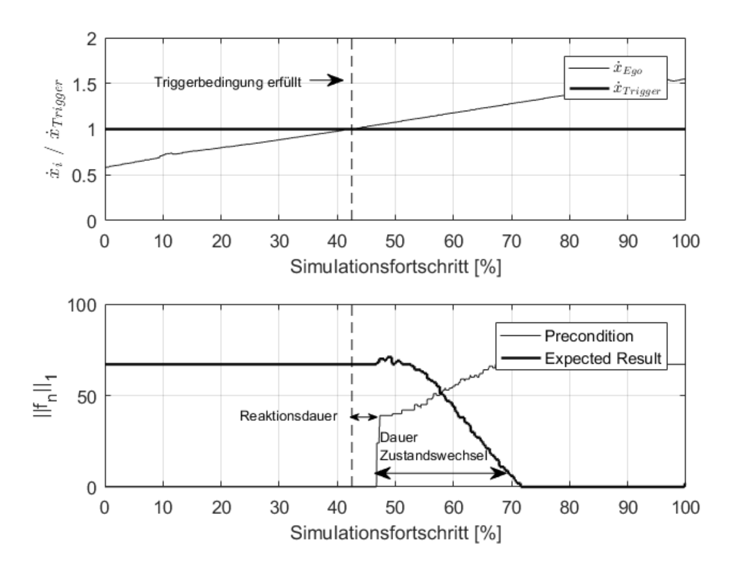


Abbildung 5.23.: Anwendung der Metrik für einen geschwindigkeitsbasierten Zustandswechsel mit dynamischen Zustandsübergang

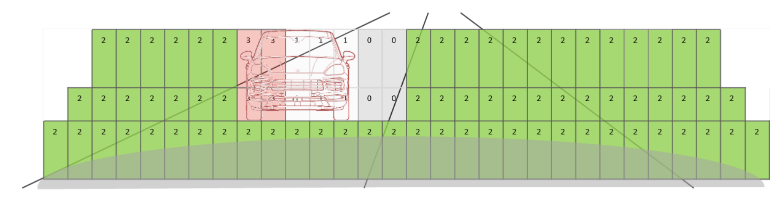


Abbildung 5.24.: Anwendung der Metrik für die Ausblendfunktion aus Sicht des Scheinwerferkoordinatensystems mit: (0) Pixel aus, trifft kein Objekt; (1) Pixel aus, trifft Objekt; (2) Pixel an, trifft kein Objekt; (3) Pixel an, trifft Objekt

dargestellt ist ein KPI der die Anzahl der abweichenden Pixel von einer Soll-Vorgabe über die Simulationszeit angibt.

Mit Hilfe dieser Metrik lassen sich sowohl die Reaktionszeit des Systems auf die Triggerbedingung, als auch die Dauer und Art des Zustandswechsels entnehmen. Die Superposition der Lichtfunktion mit dynamischem Kurvenlicht erfordert die dynamische Prädiktion der Soll-Lichtverteilung und Bewertung anhand von Toleranzgrenzen. Erweiterte anforderungsspezifische Metriken und KPIs, die auf den im Testsystem vorliegenden Daten basieren, vergleiche Abschnitt 5.1.2, können in die aufgezeigte Testsystem-Architektur integriert werden.

METRIK ZUR BEWERTUNG DER AUSBLENDFUNKTION

Die Metrik zur Bewertung der Ausblendfunktion basiert auf den Ausgangssignalen der in dieser Arbeit entwickelten Synchronisationsmethode. Diese stellt beispielhaft dar, wie durch die Reduktion der Signale auf funktionale Fehler der Lichtfunktion geschlossen werden kann. Dazu ist neben der in Abschnitt 5.3.2 aufgezeigten Metrik zur Bewertung der Szene auch eine Visualisierungsmethode erforderlich, mit der aktuelles Systemverhalten identifiziert und interpretiert werden kann.

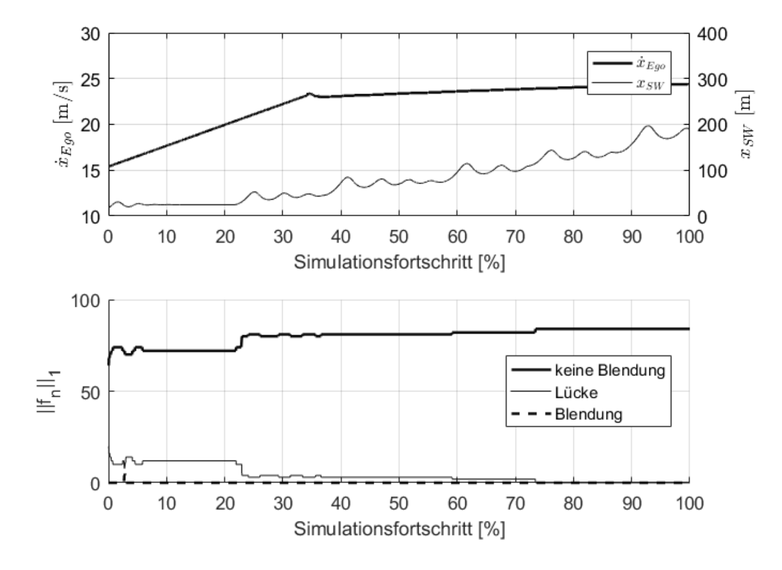


Abbildung 5.25.: Anwendung der Metrik für die Ausblendfunktion

Die Freiheitsgrade der entwickelten Bewertungsmetrik werden in dieser Umsetzung wie folgt festgelegt:

- die Fahrzeugdimension entspricht der Umhüllenden des Gesamtfahrzeugs,
- die Abstrahlcharakteristik der Lichtpixel entsprechend den im Steuergerät hinterlegten Pixelgrenzen.

Abbildung 5.24 zeigt schematisch die Online-Visualisierung der vorgestellten Bewertungsmetrik durch Einfärben der entsprechenden Zustände auf Basis der Bewertungsmetrik. Diese Visualisierung wird dabei für den linken und rechten Scheinwerfer getrennt erstellt und ist im Scheinwerferkoordinatensystem dargestellt. Erkennbar ist eine Sequenz, bei der ein entgegenkommendes Fahrzeug von insgesamt vier Lichtpixeln getroffen wird und somit mit den Prämissen dieser Bewertungsmetrik

eine Blendung erfährt. Ebenso sind Lücken und Sicherheitsbereiche um das virtuelle Fahrzeug direkt ersichtlich.

In Abbildung 5.25 wird anhand einer Testsequenz die Anwendung der Ausblendungsmetrik für das Szenario eines vorausfahrenden Fahrzeugs auf Signalebene veranschaulicht. Dabei sind Relativdistanz und die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeuges über die Zeit aufgetragen. Die implementierte Metrik zeigt bezogen auf den Simulationsfortschritt die Anzahl der Pixel auf, die in dem jeweiligen Buszyklus zu keiner Blendung (Zustand 0 und 2), einer Lücke (Zustand 1) oder einer Blendung (Zustand 3) führen, vergleiche Abschnitt 5.3.2. Die Ergebnisse können für Funktionsexperten ein hilfreiches objektives Feedback zur Qualifizierung von Lichtfunktionen in der jeweiligen Testszene darstellen und zur Optimierung von Applikationsparametern, wie einer Vergrößerung des Sicherheitsbereichs der Ausblendung, und der Eingrenzung funktionaler Fehler beitragen.

5.5 Diskussion der Ergebnisse und Empfehlung für weitere Untersuchungen

Im folgenden Abschnitt werden die in diesem Kapitel vorgestellten Methoden für den Test von Lichtfunktionen an HiL-Testsystemen diskutiert und hinsichtlich bereits publizierter Konzepte des Standes der Technik, vergleiche Abschnitt 3.3, eingeordnet.

Zu Beginn des Kapitels wurde zunächst eine grundlegende Architektur aufgezeigt, welche die Wirkkette von Lichtfunktionen, vergleiche Abschnitt 2.2, an einem HiL-Testsystem integriert. Über die Methode der direkten Bilddateneinspeisung wird die Fahrerassistenzkamera mit der Testumgebung verbunden. Neben einer VU werden über Sensor-,

Physik- und Restbusmodelle die Funktionsfähigkeit und vollständige Stimulation der Lichtfunktion sichergestellt.

Durch Metriken für adaptive Lichtfunktionen können unter einbeziehen der Bus- und Modellsignale die hochdimensionalen Helligkeitsmatrizen als Funktionsausgang der Lichtfunktion auf KPIs abgebildet und bewertet werden.

Um auch eine Bewertung zeitkritischer Funktionsanteile der assistierenden Lichtfunktionen zu ermöglichen, wird die aufgezeigte Architektur um eine Methode erweitert, die die Zustände des virtuellen Umfelds mit der aktuell vorliegende Lichtverteilung synchronisiert. Mit dieser Methodik können nun Zustände der VU valide in KPIs mit einbezogen werden und ermöglichen so die Entwicklung von Metriken für beispielsweise die Ausblendfunktion, die Schildentblendung, Führungslinien in Baustellen, der Optimierung des Kurvenlichts und weiteren Funktionen mit Bezug auf Kameraobjekte, vergleiche Abschnitt 2.2.2. Die Methodik berücksichtigt dabei auch schwankende Scheinwerfersystemzeiten, die im Falle des Tests der Ausblendfunktion zu einer situativen Vergrößerung der Fahrzeuge der Umfeldsimulation führt.

Um falsch-positive und falsch-negative Testaussagen zu vermeiden und eine Fehlereingrenzung zu ermöglichen, wird zudem eine Metrik aufgezeigt die die virtuelle Bilddateneinspeisung auf Basis der synchronisierten Daten überwachen und Fehlklassifikationen im Testbetrieb identifizieren kann.

Im Rahmen dieser Arbeit werden beispielhaft eine Metrik für adaptive Lichtfunktionen und Zustandswechsel sowie für die Ausblendfunktion vorgestellt und evaluiert.

In der Umsetzung und experimentellen Untersuchung der Methoden an einem Vorserienstand eines 84-Pixel Scheinwerfers eines Porsche Cayenne (Typ E3) konnten folgende Erkenntnisse gesammelt werden:

Tabelle 5.1.: Vergleich des Erfüllungsgrads der Anforderungen von entwickelter Testmethodik und Stand der Technik

	Stand der Technik					**Kapitel**
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**5**
(1) Platzbedarf im HiL-Labor	-	-	o	+	+	+
(2) Integration der Kamera	-	+	+	+	o	+
(3) Fahrzeugeigendaten	+	+	+	+	+	+
(4) Datenbasis für Bewertung	o	o	+	+	+	+
(5) Virtuelles Umfeld	-	+	+	+	+	+
(6) Bewertungsmethode adaptive LF	o	o	o	o	o	+
(7) Synchronisation VU und Helligkeitsmatrix	-	-	-	-	-	+
(8) Bewertungsmethode für kamerabasierte LF	-	o	-	-	-	+

- Die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Synchronisationsmethode mit aktuellen Bilddateneinspeisemethoden konnte aufgezeigt werden.
- Der verbleibende Positionsfehler nach Anwendung der Synchronisationsmethode konnte auf eine Größenordnung von 10^{-3} m abgeschätzt werden.
- Die beispielhaft entwickelten und implementierten Metriken für statische Lichtverteilungen und Zustandswechsel, das dynamische Kurvenlicht und die Ausblendfunktion zeigen das Potential, objektivierende KPIs an HiL-Testsystemen für den Test von Lichtfunktionen zu nutzen.

Im Vergleich erfolgt nach aktuellem Stand der Technik der wesentliche Teil der Bewertung von Lichtfunktionen subjektiv im Straßenverkehr und in ausgewählten Szenen auf speziellen Erprobungsstrecken, vergleiche Abschnitt 1.1. Bekannte Umsetzungen in HiL-Testsystemen, wie durch NENTWIG [25] oder SCHONLAU ET AL. [64] vorgestellt, vergleiche Abschnitt 3.3, fokussieren in ihrer Arbeit auf die Stimulation der Fahrerassistenzkamera und Bewertungen anhand der Visualisierung

in einer VU ohne dargelegte Datensynchronität. Folglich kann in diesem Kapitel hinsichtlich der Synchronisationsmethodik für zeitkritische kamerabasierte Bewertungen und der beispielhaft entwickelten objektivierenden KPIs für adaptive und assistierende Lichtfunktionen eine Weiterentwicklung zum Stand der Technik aufgezeigt werden. Tabelle 5.1 fasst den Erfüllungsgrad der in Kapitel 5 erarbeiteten Methoden mit den Ergebnissen der Diskussion in Abschnitt 3.3.3 zusammen.

Die diskutierten Ergebnisse der vorgestellten Absicherungsmethodik motivieren mögliche Erweiterungen und weitere Untersuchungen.

Die Synchronisationsmethode stellt eine Grundlage für die Entwicklung weiterer individueller Metriken zur Funktionsbewertung mittels KPIs dar. Beispielsweise können Metriken entwickelt werden, die neben der funktionalen Evaluierung auch subjektive Kriterien objektivieren und berücksichtigen. Die dafür relevanten Parameter können durch Untersuchungen in Probandenstudien ermittelt werden. Weiterhin können Methoden des Maschinellen Lernens evaluiert werden, um aktuell vorherrschende Lichtfunktionszustände zu klassifizieren.

In zukünftigen Untersuchungen können zudem Methoden entwickelt werden, die eine Integration lichttechnischer Größen wie Beleuchtungsstärken in die Bewertungsmetriken ermöglicht. Beispielsweise ist dies durch ein Scheinwerfermodell analog zu SARALAJEW ET AL. [88] oder durch echtzeitfähige Messung wie durch WALDNER ET AL. [68] aufgezeigt erreichbar.

Basierend auf der Annahme, dass künftige Lichtfunktionen in modernen Fahrerassistenzarchitekturen auf fusionierten Objektdaten mehrerer Sensoren beruhen, kann eine Erweiterung der Synchronisationsmethode auf weitere Sensoreinspeisungen wie Radar oder Lidar entwickelt und untersucht werden [85].

KAPITEL 6

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

6.1 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit werden Methoden erarbeitet und evaluiert, die eine Integration und Bewertung von Lichtfunktionen an Hardware-in-the-Loop-Testsystemen ermöglichen. Neben einer steigenden Objektivierung, Reduktion von Realerprobungen und damit Unabhängigkeit von Tageszeit und Witterung, werden die Ansätze dieser Arbeit motiviert durch die speziellen Anforderungen an Testumgebungen für Lichtfunktionstests. Im Rahmen dieser Arbeit stehen Integrationsmethoden für Fahrerassistenzkameras unter Berücksichtigung hoher Kontrastdarstellungen sowie die Notwendigkeit zeitkritischer Bewertungsmethoden für die Ausblendfunktion im Fokus der Untersuchungen.

Basierend auf einer Analyse des Standes der Technik werden bereits publizierte simulationsbasierte Testsysteme mit realen Hardwarekomponenten vorgestellt und bestehende Herausforderungen hinsichtlich der Schwerpunkte dieser Arbeit aufgezeigt.

Hinsichtlich der Stimulation realer Fahrerassistenzkameras und der Darstellung von Nachtfahrten zeigen die Ergebnisse, dass eine lichttechnisch realitätsnahe Darstellung virtueller Nachtfahrten über Bildwiedergabegeräte durch Limitierungen in maximaler Helligkeit und Kontrast nicht erreicht werden kann. In aktuellen Methoden des Standes der Technik können diese Einschränkungen für definierte Fahrszenen durch Anbringen zusätzlicher Lichtquellen wie LED-Grids verbessert werden.

Gemeinsame Nachteile dieser Methoden sind die wahrnehmbare Diskretisierung der LEDs bei Bewegungssimulation, die Wahrnehmung multipler Leuchtquellen bei geringen Simulatordistanzen und die störende Aufhellung weiterer Simulatorbereiche durch die ungerichtete Abstrahlung der Leuchtquellen.

Das in dieser Arbeit entwickelte projektorbasierte Konzept basiert auf einer effizienten Lichtnutzung und, um hohe Kontraste zu gewährleisten, getrennten Darstellungsmethoden für dunkle und helle Bereiche der Simulation. Zwei Umsetzungen werden dieser Idee folgend konzeptionell ausgearbeitet und evaluiert: Eine basierend auf retroreflektierenden Partikeln und eine zweite basierend auf RGB-empfindlichen holographischen Diffusoren. Die vielversprechendere Methode mit holographischer Folie wird prototypisch umgesetzt und ermöglicht zudem konzeptionell betrachtet eine Farbdarstellung im Simulator. Eine Kalibrierung der Projektion und Leuchtdichte ermöglicht mit einem prototypischen Diffusor die Darstellung einer statischen Nachtfahrszene eines entgegenkommenden Fahrzeugs im Abblendlicht.

Durch experimentelle Untersuchungen kann die prinzipielle Funktionsfähigkeit des holographischen Ansatzes aufgezeigt werden. So sind im Versuchsaufbau maximale Helligkeiten von 80.000 cd/m^2 bis 140.000 cd/m^2 erreichbar. Am Beispiel der Simulation eines Porsche Vier-Punkt-Lichts in der dargestellten Fahrszene wird schließlich die geometrisch korrekte Darstellung der Scheinwerfertextur evaluiert. Gegenwärtige, teilweise methodische Limitierungen des Versuchsaufbaus betreffen die Größe und die Kosten des zur Verfügung stehenden holografischen Diffusors, die ungleichen Beugungseffizienzen in RGB die in einem künftig vermeidbaren grün-dominierten Bild resultieren. Weiterhin zeigen die in den Untersuchungen verwendeten Projektoren Limitierungen im statischen Bildkontrast und Schwarzwert, die sich durch die effiziente Lichtnutzung in einer Überstrahlung dunkler Bildbereiche äußert. Ebenso resultiert aus dem Abstand der Projektions-

fläche von Auf- und Rückprojektion ein Doppelbild, das allerdings in zukünftigen Aufbauten durch direktes Aufbringen des holographischen Diffusors auf der Rückprojektionsscheibe vermieden werden kann.

In einem weiteren Schritt wird in einer ganzheitlichen Betrachtung die Entwicklung einer Methode für den funktionalen Test einer am HiL-Testsystem integrierten Lichtfunktion durchgeführt. Abgeleitet aus den Erkenntnissen der Analyse des Standes der Technik, basiert diese auf einer direkten Bilddateneinspeisung zur Stimulation der Fahrerassistenzkamera und enthält zudem die realen Steuergeräte von Sensordatenverarbeitung und Lichtfunktion. Eine virtuelle Umfeldsimulation bildet die Basis für Sensormodelle und die simulierte Fahrdynamik und stellt eine vollständige Stimulation der Lichtfunktion sicher.

Um die Evaluierung zeitkritischer Lichtfunktionen wie der Ausblendfunktion zu ermöglichen, wird im Rahmen dieser Arbeit eine neue Methode zur Synchronisation der Daten der virtuellen Umfeldsimulation und der Ausgangsdaten der integrierten Lichtfunktion entwickelt. Mit dieser ist es möglich Objektzustand und Lichtfunktionszustand valide zusammenzuführen und über Metriken auf KPIs abzubilden. Diese Methodik berücksichtigt dabei auch schwankende Scheinwerfersystemzeiten, die im Falle des Tests der Ausblendfunktion zu einer situativen Vergrößerung der Fahrzeuge der Umfeldsimulation führt. Im Rahmen dieser Arbeit werden beispielhaft Metriken für adaptive Lichtfunktionen und Zustandswechsel sowie für die Bewertung der Ausblendfunktion aufgezeigt.

Anhand der prototypischen Umsetzung an einem HiL-Testsystem für eine Lichtfunktion für 84-Pixel Scheinwerfersysteme kann die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Synchronisationsmethode und beispielhaften Metriken aufgezeigt werden. Um Auswirkung nach der Synchronisation verbleibender Zeitdifferenzen auf ein vernachlässigbares Minimum zu reduzieren, werden diese mittels Interpolation der Umfeldzustände

korrigiert. Schließlich wird durch eine Methode zur Überwachung der Kameraeinspeisung die Eingrenzung von Fehlerursachen im Testsystem ermöglicht. Hinsichtlich der Synchronisationsmethode und der damit implementierbaren Metriken kann ein Fortschritt zum aktuellen Stand der Technik aufgezeigt werden.

6.2 AUSBLICK

Die Auflösung und Vielfalt von Lichtfunktionen wird, ermöglicht durch neue innovative Scheinwerfertechnologien, auch zukünftig weiter zunehmen. Durch den zeitgleichen Trend abnehmender Fahrzeugerprobungen führt dies zu einem weiter steigenden Effizienzdruck in der Funktionsabsicherung. Folglich wird sich auch die Bedeutung simulationsbasierter Testmethoden für Lichtfunktionen weiter erhöhen.

Abgeleitet aus den Untersuchungsergebnissen in Kapitel 4, können weitere Untersuchungen des Ansatzes mit holographischer Folie motiviert werden. Dabei können der holographische Diffusor und der zugehörige Projektor auf die spektrale Sensorempfindlichkeit einer Ziel-Fahrerassistenzkamera ausgelegt werden und damit die Untersuchung plausibler Farbdarstellungen und Helligkeiten im Kamerabild ermöglichen. Ebenso kann, um höhere Wirkungsgrade zu erzielen, das Stapeln von monochromatischen Diffusoren evaluiert werden.

Im Kontext der entwickelten Testumgebung und Bewertungsmethodik für Lichtfunktionen in Kapitel 5 können in zukünftigen Untersuchungen weitere geeignete Kosten- und Gütefunktionen für lichtbasierte Assistenzsysteme entwickelt werden. Neben funktionalen Tests, kann auch die Erweiterungen auf Metriken mit subjektive Bewertungskriterien evaluiert werden. Durch Probandenstudien bietet sich das Potential der Identifikation geeigneter Kriterien, um weitere Realerprobungsanteile

an simulationsbasierte Testsysteme zu übertragen. Eine weitere Bewertungsgröße kann den Metriken durch eine echtzeitfähige Erfassung der Lichtverteilung realer oder modellierter Scheinwerfer hinzugefügt werden.

Unter der Annahme, dass künftige Fahrerassistenzarchitekturen auf Basis leistungsfähiger Sensordatenfusionen die Objektdaten für Lichtfunktionen bereitstellen, kann eine Erweiterung der Synchronisationsmethode auf weitere Sensoreinspeisungen wie Radar oder Lidar entwickelt und untersucht werden [85].

LITERATUR

[1] S. Strebel und C. Neumann. “Durchgängige simulative Evaluierung von Lichtfunktionen”. *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: 8. VDI-Tagung*. 2018, S. 159–172.

[2] S. Strebel und C. Neumann. “Simulative Absicherung von lichtbasierten Fahrerassistenzfunktionen”. *7. AutoTest Fachkonferenz: Test von Hard- und Software in der Automobilentwicklung*. FKFS – Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren. 2018.

[3] M. Hamm. “Safety Improvement generated by Pioneering New Matrix and Direction Indicator Functionalities”. *ISAL 2013 - 10th International Symposium on Automotive Lighting*. 2013, S. 319–329.

[4] F.-J. Kalze, U.-C. Knaack und B. Böke. “Mehrzeiliges Scheinwerfersystem in der Mercedes-Benz E-Klasse”. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 118.2 (2015), S. 16–23.

[5] E. O. Rosenhahn, H. Seibold, J. Geywitz-Senn und I. Rutkiewicz. “Digitales Licht Millionen Pixel auf der Straße”. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 120.11 (2018), S. 46–49.

[6] Audi AG. *Pressemitteilung: Digitale Matrix LED-Scheinwerfer: eine Million Pixel im Tanz*. https://tinyurl.com/ssgqblk. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2019.

[7] Audi AG. *Pressemitteilung: Dynamisch, sicher, intelligent: das Licht der Zukunft*. https://tinyurl.com/y5gnowdn. letzter Zugriff: 29.09.2020. 2020.

[8] H.-B. Abel u. a. “Elektrik/Elektronik/Software”. In: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 925–1104.

[9] A. Albers, M. Behrendt, S. Klingler und K. Matros. “Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess”. In: *Handbuch Produktentwicklung*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 541–569.

[10] DIN EN ISO 9000:2015-11. *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Beuth Verlag GmbH. 2015.

[11] E. Sax (Hrsg.) *Automatisiertes Testen Eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie*. Carl Hanser Verlag, 2008.

[12] Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH. *V-Modell 97 - komplett im Format Word (Teil 1-3)*. https://tinyurl.com/qrn9vld. letzter Zugriff: 05.08.2020. 1997.

[13] Verein zur Weiterentwicklung des V-Modell XT e.V. (Weit e.V.) *V-Modell XT - Version 2.0*. https://tinyurl.com/qrn9vld. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2015.

[14] ISO 26262:2018. *Road vehicles – Functional safety*. International Organization for Standardization. Standard. 2018.

[15] U. Wilhelm, S. Ebel und A. Weitzel. “Funktionale Sicherheit und ISO 26262.” In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme.* Hrsg. von H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, S. 85–103.

[16] M. Kirchmayr. “Zur Parallelisierung von Systemintegrationstests im E/E Umfeld”. Diss. Universität Ulm, 2009.

[17] A. Weitzel u. a. *Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung - Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen*. 98. Fachverlag NW in der Carl Schuenemann Verlag GmbH, 2014.

[18] German Testing Board e.V. *ISTQB/GTB Standardglossar der Testbegriffe in Deutsch - Version 3.2.4*. https://tinyurl.com/yyfqsgrv. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2019.

[19] S. Hakuli und M. Krug. “Virtuelle Integration.” In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme.* Hrsg. von H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, S. 125–138.

[20] K. Neumann-Cosel, M. Dupuis und C. Weiss. “Virtual Test Drive. Provision of a consistent tool-set for [D,H,S,V]-in-the-loop”. *Proceedings of the DSC Europe*. 2009.

[21] IPG Automotive GmbH. *CarMaker: Pkw und leichte Nutzfahrzeuge virtuell testen*. Produkt-Homepage: https://tinyurl.com/rnygx6d. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2020.

[22] ASAM e. V. *ASAM OpenDRIVE v 1.6.0*. https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2020.

[23] ASAM e. V. *ASAM OpenSCENARIO v 1.0.0*. https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/. letzter Zugriff am: 05.08.2020. 2020.

[24] J. Bach. “Methoden und Ansätze für die Entwicklung und den Test prädiktiver Fahrzeugregelungsfunktionen”. Diss. Karlsruher Institut für Technologie, 2018.

[25] M. Nentwig. “Untersuchungen zur Anwendung von computergenerierten Kamerabildern für die Entwicklung und den Test von Fahrerassistenzsystemen”. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, 2013.

[26] M. Feilhauer, J. Haering und S. Wyatt. “Current Approaches in HiL-Based ADAS Testing”. *SAE International Journal of Commercial Vehicles* 9.2 (2016), S. 63–69.

[27] Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. *Porsche VM Mediendatenbank*. http://vmmedia.porsche.de. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2020.

[28] J. Roslak und C. Wilks. “Hochauflösende LCD-Scheinwerfer Herausforderungen für Elektronikarchitekturen”. *ATZelektronik* 12.6 (2017), S. 48–53.

[29] G. Benderman, S. Söhner und H. Zimmermann. “Usage of CAN and CAN FD for high-definition headlight systems”. *Proceedings of the 15th international CAN Conference*. 2015.

[30] J. H. Sprute und T. Q. Khanh. “Approval Requirements for a Front-Lighting System with Variable Cut-Off Line in Europe”. *ISAL 2007 - 7th International Symposium on Automotive Lighting*. 2007, S. 31–37.

[31] T. Q. Khanh und W. Huhn. “Sichtverbesserungssysteme.” In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme.* Hrsg. von H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, S. 815–839.

[32] L. Evrard, B. Reiss, J. Ripperger und D. Cabanne. “Modularer Aufbau für blendfreies LED-Fernlicht”. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 117.2 (2015), S. 26–31.

[33] M. Punke, S. Menzel, B. Werthessen, N. Stache und M. Höpfl. “Kamera-Hardware.” In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme.* Hrsg. von H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, S. 347–368.

[34] S. Soehner. “Entwicklung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation”. Diss. Karlsruher Institut für Technologie, 2015.

[35] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa. *Regelung Nr. 98: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer mit Gasentladungslichtquellen. Revision 3.* 2012.

[36] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa. *Regelung Nr. 123: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen (AFS) für Kraftfahrzeuge. Revision 2.* 2016.

[37] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa. *Regelung Nr. 112: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen und/oder LED-Modulen ausgerüstet sind. Revision 2.* 2011.

[38] S. Omerbegovic, C. Funk und C. Neumann. "Artificial intelligence for future light-based assistance systems". *ISAL 2015 - Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. 2015, S. 423–430.

[39] B. Kubitza und C. Wilks. "Digitales Licht als Unterstützung für den Fahrer". *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 120.4 (2018), S. 56–59.

[40] S. Berlitz, M. Hamm und C. Funk. "Matrix-LED-Scheinwerfer von Audi". *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 116.3 (2014), S. 10–15.

[41] C. Schneider u. a. "Tiefenwahrnehmung basierend auf aktuellen Scheinwerferentwicklungen". *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: 8. VDI-Tagung*. 2018, S. 107–128.

[42] H. Hesse. "LCD-Scheinwerfer für eine volladaptive Beleuchtung". *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 117.11 (2015), S. 50–55.

[43] S. Grötsch u. a. “Integrated High Resolution LED Light Sources in an AFS/ADB Headlamp”. *ISAL 2015 - Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. 2015, S. 241–250.

[44] D. Gester, O. Schütze und J. Meyer. “Optische Assistenzsysteme im HiL-Test - Schärfer Testen mit digitaler Brille”. *ATZ extra* 1 (2015), S. 60–63.

[45] S. Strebel und C. Neumann. “Dynamic Glare Simulation in Virtual Night Driving”. *Proceedings of the Driving Simulation Conference 2018 Europe VR*. 2018, S. 151–155.

[46] S. Strebel und C. Neumann. “Creating high contrast in virtual night driving”. *Advanced Optical Technologies* 8.1 (2018), S. 47–54.

[47] D. Hertel. “Extended use of incremental signal-to-noise ratio as reliability criterion for multiple-slope wide-dynamic-range image capture.” *Journal of Electronic Imaging* 19.1 (2010).

[48] Z.-L. Lu und B. Dosher. *Visual Psychophysics*. The MIT Press, 2013.

[49] Samsung Electronics Co. Ltd. *The Wall IW008R*. Produkt-Homepage: https://tinyurl.com/qo5d5lo. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2020.

[50] C. Chinnock. *Dolby Vision and HDR10*. White Paper of Insight Media, 2016.

[51] VISCON GmbH. *VR LED Wand*. Produkt-Homepage: https://tinyurl.com/y7owyd38. letzter Zugriff: 20.12.2020. 2020.

[52] LEDALL Media Engineering. *OUTDOOR SERIES: arctiCube*. Produkt-Homepage: https://tinyurl.com/y7wjc9lk. letzter Zugriff: 21.12.2020. 2020.

[53] Carl Zeiss Jena GmbH. *ZEISS VELVET SIM LED Spezifikation*. Produkt-Homepage: https://tinyurl.com/uj6zxdw. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2019. URL: https://tinyurl.com/uj6zxdw.

[54] A. Bolling, G. Sörensen und J. Jansson. “Simulating the Effect of Low Lying Sun and Worn Windscreens in a Driving Simulator”. *Trends in Driving Simulation Design and Experiments: Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2010*. Hrsg. von A. Kemeny, F. Mérienne und S. Espié. 2010, S. 23–31.

[55] N. Müller. “Komplexitätswahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehrsraum – Einflussfaktoren und Analyse”. Diss. TU Darmstadt, 2017.

[56] A. Hwang und E. Peli. “Development of a headlight glare simulator for a driving simulator”. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 32 (2013), S. 129–143.

[57] B. Haycock, J. Campos, N. Koenraad, M. Potter und S. Advani. “Creating headlight glare in a driving simulator”. *Transportation Research Part F* 61 (2019), S. 93–106.

[58] M. Fullerton und E. Peli. “Development of a System to Study the Impact of Headlight Glare in a Driving Simulator”. *Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*. 2009, S. 412–418.

[59] A. Hwang und E. Peli. “Headlight Glare Simulator for a Driving Simulator 2.0”. *Proceedings of the 3rd International Conference on Road Safety and Simulation*. 2011.

[60] B. Haycock, N. Koenraad, M. Potter und S. Advani. “Creating Headlight Glare in a Driving Simulator”. *New trends in driving simulator design and testing: Proceedings of DSC 2016 Europe Driving Simulation Conference & Exhibition*. Hrsg. von A. Kemeny, F. Mérienne, F. Colombet und S. Espié. 2016, S. 77–84.

[61] M. Klomp und V. Wareborn. “Virtuelle Entwicklung aktiver Lichtfunktionen”. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 121.2 (2019), S. 16–21.

[62] A. Opfermann, T. Bertram, D. Baum und P. Karas. “A new hardware-in-the-loop platform for the evaluation of adaptive lighting systems”. *Proceedings of the 17th World Congress - The International Federation of Automatic Control* 41.2 (2008), S. 4446–4451.

[63] S. Bogdanow, M. Marutzky, R. Zschoppe und U. Voigt. “Neue Testmethoden für kamerabasierte Lichtassistenzsysteme”. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 113.10 (2011), S. 752–757.

[64] B. Schonlau, K. Schulze und M. Butenuth. “Automatisierte Closed-Loop-Tests für Lichtassistenzsysteme”. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 116.10 (2014), S. 42–47.

[65] B. Gerbeth, B. Schonlau und U. Wehner. “Absicherung von kamerabasierten Fahrerassistenzsystemen im Fahrzeuglabor”. *ATZelektronik* 11.3 (2016), S. 42–45.

[66] S.-A. Schneider, J. Frimberger und M. Folie. “Significant Reduction of Validation Efforts for Dynamic Light Functions with FMI for Multi-Domain Integration and Test Platform”. *Proceedings of the 10th International Modelica Conference, March 10-12*, 2014, S. 395–399.

[67] S.-A. Schneider, J. Frimberger und M. Folie. “Reduzierter Aufwand für dynamische Lichtfunktionen”. *ATZelektronik* 9.2 (2014), S. 42–47.

[68] M. Waldner und T. Bertram. “Evaluation of the light distribution of a matrix-headlight with a Hardware-in-the- Loop-simulation”. *ISAL 2019 - 13th International Symposium on Automotive Lighting*. 2019, S. 211–220.

[69] A. Z. Krahnstoever. “Licht führt!? - Einsatzmöglichkeiten von lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen in Einfädelsituationen”.

Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: 7. VDI-Tagung. 2016, S. 245–254.

[70] P. Lecocq, J. Kelada und A. Kemeny. “Interactive Headlight Simulation”. *Proceedings of the DSC’99 Driving Simulation Conference* (1999).

[71] S. Knebel. “Modellierung der Umweltbeleuchtung durch Fahrzeugscheinwerfer in der Fahrsimulation”. Masterarbeit. Universität Koblenz, 2004.

[72] B. T. Phong. “Illumination for computer generated pictures”. *Communications of the ACM* 18.6 (1975), S. 311–317.

[73] S. Strebel und C. Neumann. *Patentschrift: Anordnung zur fahrsituativen Simulation von Blendungseffekten oder blendungsähnlichen Effekten*. DE 102017204435 A1. 2017.

[74] S. Strebel, Y. Chamseddine und S. Miemietz. *Patentschrift: Anordnung zur fahrsituativen Simulation von Blendungseffekten*. DE 102017204350 B3. 2017.

[75] DIN 67520:2013. *Retroreflektierende Materialien zur Verkehrssicherung – Lichttechnische Mindestanforderungenan Reflexstoffe*. Beuth Verlag GmbH. 2013.

[76] Orafol Europe GmbH. *ORALITE® 5810 High Intensity Grade*. Technisches Datenblatt. 2018.

[77] B. S. Mayer. “Holographie in der Display Technologie”. Diss. Karlsruher Institut für Technologie, 2015.

[78] M. Schmiedchen. “Modellbildung und Realisierung von Holografischen Aufprojektionsflächen”. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2005.

[79] M.-L. Piao, K.-C. Kwon, H.-J. Kang, K.-Y. Lee und N. Kim. “Full-color holographic diffuser using time-scheduled iterative exposure”. *Applied Optics* 54.16 (2015), S. 5252–5259.

[80] M. Bossler. “Kalibrierung und Evaluierung eines Versuchsaufbaus zur realitätsnahen Visualisierung von Blendsituationen, (betreute Abschlussarbeit)”. Duale Hochschule Baden-Württemberg, Bachelorarbeit. 2018.

[81] Z. Zhang. “Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations”. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Bd. 1. 1999, S. 666–673.

[82] J.-Y. Bouguet. *Camera Calibration Toolbox for Matlab.* https://tinyurl.com/c89flr. Letzter Zugriff: 05.08.2020. 2015.

[83] D. Moreno und G. Taubin. “Simple, accurate, and robust projector-camera calibration”. *Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission*. 2012, S. 464–471.

[84] G. Falcao, N. Hurtos, J. Massich und D. Fofi. *Projector-Camera Calibration Toolbox*. http://code.google.com/p/procamcalib. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2009.

[85] S. Strebel. *Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zur Überwachung an einem Fahrzeugprüfstand.* DE 102018120119 A1. 2018.

[86] S. Strebel. *Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zur synchronen Einspeisung an einem Fahrzeugprüfstand*. DE 102018120121 B3. 2018.

[87] G. Hetzel und F. Strecker. “Sportliche Modelle”. *dSPACE Magazin*. 2. dSPACE GmbH. 2015, S. 18–23.

[88] S. Saralajew, S. Mates, K. Stefaniak und H. Zimmermann. “Rapid Prototyping of headlamp light distributions”. *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: 7. VDI-Tagung*. 2016, S. 83–94.

[89] S. Saralajew und G. Benderman. “Matrix Algorithm: How fast is possible”. *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: 7. VDI-Tagung*. 2016, S. 51–62.

[90] Expleo Germany GmbH. *Produkt-Homepage: Trentino Bildeinspeiseadapter*. https://tinyurl.com/qnecbdj. Zuletzt abgerufen: 05.08.2020. 2019. URL: https://www.assystem-germany.com/produkte/trentino/.

[91] dSPACE GmbH. "Produkt-Homepage: Scalexio - Modulares Echtzeitsystem" (2019). Zuletzt abgerufen: 05.08.2020, S. 18–23.

[92] Keysight Technologies, Inc. *Infiniium 9000 Series Oscilloscopes*. Technisches Datenblatt: https://tinyurl.com/y4anlwqs. Zuletzt aufgerufen: 05.08.2020. 2019.

[93] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH. *Video Photometer V2.1 - Imaging Light and Colour Measuring Technique. LMK 5.* Technisches Datenblatt: https://tinyurl.com/y3t8slup. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2016.

[94] Haida-Deutschland. *Haida Pro II Optical MC Serie ND Filter*. Technisches Datenblatt: https://tinyurl.com/thwvyrd. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2019.

[95] Canon Deutschland GmbH. *Canon EOS 700D Technische Daten*. https://tinyurl.com/qku846o. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2020.

[96] Konica Minolta, Inc. *Illuminance Spektrophotometer CL-500A*. Technisches Datenblatt: https://tinyurl.com/y3vh6fx8. Letzter Zugriff: 05.08.2020. 2019.

[97] Optoma Deutschland GmbH. *W304M DLP Projector*. Technisches Datenblatt: https://tinyurl.com/sujaf88. zuletzt abgerufen: 05.08.2020. 2020.

[98] EPSON Deutschland GmbH. *Produkt-Homepage: EPSON EH-TW6100*. https://tinyurl.com/wedebke. letzter Zugriff: 05.08.2020. 2020.

[99] T. Fink. Persönliche Bereitstellung der Rohdaten und des holographischen Diffusors durch Dr. Thomas Fink. 2017.

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

ACT	Action
AFS	Advanced-Front-Lighting-System
BV	Bilddatenverarbeitung
CAD	Computer-Aided-Design
CAN	Controller-Area-Network
CFA	Color-Filter-Arrays
CMOS	Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor
DII	Direct-Image-Injection
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMD	Digital-Micromirror-Device
DR	Dynamic-Range
E/E	elektrisch/elektronisch
ECE	Economic-Commission-for-Europe
ECU	Electronic-Control-Unit
EGO	Fahrzeug des SuT
ER	Expected Result
F	Fahrzeug
FLA	Fernlichtassistent
FOV	Field-of-View
FPGA	Field-Programmable-Gate-Array
GLW	gleitende Leuchtweitenregelung
HDG	Hell-Dunkel-Grenze
HiL	Hardware-in-the-Loop
HOE	Holographisch-optische Elemente
I/O	Input/Output
ID	Identifikator
IR	Infrarot

ISO	Internationale Organisation für Normung
ISTQB	International-Software-Testing-Qualifications-Board
K	Kamera
KPI	Key-Performance-Indikator
LCD	Liquid-Crystal-Display
LED	Light-Emitting-Diode
LIDAR	Laser-Detection-And-Ranging
LF	Lichtfunktion
LMK	Leuchtdichtekamera
LQM	Lichtquellenmodul
LV	Lichtverteilung
LVDS	Low-Voltage-Differential-Signaling
LWR	Leuchtweitenregelung
ME	maximaler Fehler (maximum error, engl.)
MAD	engl. Median absolute deviation
μAFS	Micro-Structured-Adaptive-Front-Lighting-System
μP	Mikroprozessor
MiL	Model-in-the-Loop
OEM	Original-Equipment-Manufacturer
PDLS+	Porsche Dynamic Light System Plus
PRE	Precondition
PWM	Pulsweitenmodulation
r	real
RADAR	Radio-Detection-And-Ranging
RBS	Restbussimulation
RCCC	Red-Clear-Clear-Clear
RDB	Runtime-Data-Bus
RGB	Rot, Grün, Blau
SD	Standardabweichung (standard deviation, engl.)
SiL	Software-in-the-Loop
SuT	System-under-Test
SW	Scheinwerfer

UART	Universal-Asynchronous-Receiver-Transmitter
v	virtuell
ViL	Vehicle-in-the-Loop
VTD	Virtual Test Drive
VU	Virtuelle Umfeldsimulation
XiL	X-in-the-Loop

SYMBOLVERZEICHNIS

α	horizontale Winkelgröße im Scheinwerferkoordinatensystem
$\Delta\alpha_{ges}$	aus t_{ges} resultierende horizontale Objektverschiebung im Scheinwerferkoordinatensystem
α_+, α_-	maximale und minimale horizontale Objektgröße nach Anwendung der Methode zur Kompensation von schwankenden Scheinwerfersystemzeiten
α_1, α_r	linke und rechte horizontale Abstrahlgrenze eines Lichtpixels im Scheinwerferkoordinatensystem
A_H	wirksame Fläche der Leuchtdichte
β	vertikale Winkelgröße im Scheinwerferkoordinatensystem
β_+, β_-	maximale und minimale vertikale Objektgröße nach Anwendung der Methode zur Kompensation von schwankenden Scheinwerfersystemzeiten
β_o, β_u	obere und untere vertikale Abstrahlgrenze eines Lichtpixels im Scheinwerferkoordinatensystems
d_o	Abstand zwischen Beobachter / Kamera und Simulationsschirm
d_r	Abstand zwischen Beobachter- und Projektorbrennpunkt
DR	Gesamtdynamikumfang (Dynamic Range, engl.)
ϵ	Konstante in Bewertungsmetrik der Kamera
ϵ_H	Winkel der die geometrische Orientierung der Fläche A_H wiedergibt
$\eta(\lambda)$	wellenlängenabhängige Beugungseffizienz des holographischen Diffusors

$E_{v,\perp}$	Beleuchtungsstärke orthogonal zum Simulationsschirm
f_K	Frequenz der Fahrerassistenzkamera
f_{Bus}	Frequenz der Lichtverteilung auf dem Fahrzeugbus
f_{VU}	Frequenz der virtuellen Umfeldsimulation
$f_n, \tilde{f}_n$	Abbildungsvorschrift für jeden Lichtpixel n
g_n	Abbildungsvorschrift für jeden Lichtpixel n
h_n	Abbildungsvorschrift für jeden Lichtpixel n
i	Summationsindex
I_v	Lichtstärke (Photometrie)
$ID_{k,DII}$, $ID_{k,VU}$	Im HiL-Simulator erfasster Identifikator der direkten Rohbilddateneinspeisung (DII) oder des virtuellen Umfelds (VU) zum Zeitpunkt t_k
K	Kontrast
K_m	photometrisches Strahlungsäquivalent
L_v	Leuchtdichte (Photometrie)
$LV_{k,Bus}$	Lichtverteilung des Fahrzeugbus, im HiL-Simulator erfasst zum Zeitpunkt t_k
$LV_{k,synch}$	synchronisierte Lichtverteilung
LV_{soll}	Für den konkreten Testdurchlauf vorgegebene Soll-Lichtverteilung
LV_{ist}	Im konkreten Testdurchlauf erfasste Ist-Lichtverteilung
$\mathbf{M}_F^{SW}$	Koordinatentransformation von Fahrzeug zu Scheinwerfer
$\mathbf{M}_W^F$	Koordinatentransformation von Welt zu Fahrzeug
n	Index für Lichtpixel
$\mathbf{O}_{k,VU}$	Im HiL-Simulator erfasste Menge aller Objektzustände der Umfeldsimulation zum Zeitpunkt t_k
$\mathbf{O}_{k,synch}$	synchronisierter Objektzustand
Ω	Raumwinkel der Reflexion

φ	Beobachtungswinkel zwischen Beobachter und Projektor
$\Phi_{el}(\lambda)$	spektrale Strahlungsleistung des Projektors
R_A	Materialspezifischer Reflexionskoeffizient
R_l	Restglied zur Abschätzung des verbleibenden Fehlers nach einer Interpolation
R_n	Tupel das für jedes n-te Lichtpixel eines Scheinwerfers die vertikale und horizontale Abstrahlcharakteristik enthält
ρ_R	Dichte der retroreflektierenden Partikel auf dem Simulatorschirm
Δt_1	Datenverarbeitungszeit der virtuellen Umfeldsimulation mit Bildsynthese, Bildsensormodell und virtuelle Rohbilddateneinspeisung
Δt_2	Datenverarbeitungszeit des Scheinwerfers von Fahrzeugbus auf Anpassung der PWM
$\tilde{t}_2$	angenommene mittlere Datenverarbeitungszeit des Scheinwerfers von Fahrzeugbus auf korrespondierende PWM
Δt_{SW}	Schwankung der Scheinwerfersystemzeit um $\tilde{t}_2$
Δt_{ges}	methodischer zeitlicher Gesamtfehler resultierend aus der Datenverarbeitungszeit von Scheinwerfer und Bilddatengenerierung
Δt_{res}	verbleibender zeitlicher Fehler nach der Synchronisationsmethode
t_0	Entwicklungspunkt in Restgliedabschätzung
t_k	Diskreter Messzeitpunkt des HiL-Simulators
T_K	Periodendauer der Fahrerassistenzkamera
T_{Bus}	Periodendauer der Lichtfunktion auf dem Fahrzeugbus
ϑ	Anleuchtwinkel des Projektorlichts auf dem Simulatorschirm

u	horizontale Bildpixel
U_{LED},U_{CAN}	elektrische Spannung
U_{max}	maximale elektrische Spannung
v	vertikale Bildpixel
$V(\lambda)$	Die Helligkeitempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges für photopisches Sehen
$(x, y, z)_{W,F,K,SW}$	Ortspunkt von Objekten bezogen auf Weltreferenzpunkt (W), Fahrzeugreferenzpunkt (F), Kamera- oder Scheinwerferverbauposition (SW).
x_{Bus}	Auf dem Fahrzeugbus erfasste relative Objektdistanz in x-Richtung
x_{VU}	In der virtuellen Umfeldsimulation erfasste relative Objektdistanz in x-Richtung
$(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})_{W,F,K,SW}$	(Relativ-)Geschwindigkeit von Objekten bezogen auf Weltreferenzpunkt (W), Fahrzeugreferenzpunkt (F), Kamera- oder Scheinwerferverbauposition (SW).
$\dot{x}_{Ego}$	Eigengeschwindigkeit des Fahrzeugs mit SuT
$\dot{x}_{Trigger}$	Trigger für eine geschwindigkeitsbasierte Funktionsauslösung

A Anhang

A.1 Hardware-Komponenten des HiL-Testsystems

Für die experimentellen Untersuchungen mit Hardware-in-the-Loop-Testsystem in Kapitel 5.4 kommen nachfolgend aufgeführte Komponenten zum Einsatz.

A.1.1 Trentino Bilddateneinspeisung

Die *Trentino* Bilddateneinspeisung der Firma Expleo Germany GmbH bietet die Möglichkeit der Einspeisung virtueller Bilddaten eines Kamerasensormodells über einen emulierten Bildsensor. Es ermöglicht damit die Anbindung der Bildverarbeitung in das SuT an einem HiL-Testsystem. Dies kann durch eine einmalige Anpassung der Kamerahardware und ein entsprechendes Sensormodell umgesetzt werden. [90]

In Tabelle A.1 sind die technischen Daten des *Trentino* Bildeinspeiseadapters angegeben, der im Rahmen dieser Arbeit um die in Kapitel 5 entwickelten Methoden zum Abgriff der *IDs* und der Nutzung des UART-Schnittstelle als echtzeitfähige Verbindung zum HiL-Simulator erweitert wurde.

Tabelle A.1.: Technische Daten des *Trentino* Bildeinspeiseadapters, vergleiche [90]

Beschreibung	**Eigenschaften**
Schnittstellen zur Kamera	individuelle Anpassung
Schnittstellen zu Testrechner	DisplayPort++ (DP++)
Unterstützte Farbtiefe pro Pixel	8 Bit / 12 Bit / 16 Bit
Abmessungen (B x L x H)	ca. 255 x 230 x 40 mm
Energieversorgung	12 V

A.1.2 HiL-Simulator

In dieser Arbeit wird ein *Scalexio* HiL-Simulator der Firma dSPACE GmbH verwendet. Dieser eignet sich durch enthaltene Hochleistungsprozessoren und leistungsfähige I/O-Anbindungen für echtzeitfähige Closed-Loop HiL-Anwendungen. Als Visualisierungssoftware für aktuelle Zustände der integrierten Modelle wird auf die Software *Control Desk* zurückgegriffen. [91]

In Tabelle A.2 sind die technischen Daten des Simulators angegeben, der für einen prototypischen Vorserienstand eines *Cayenne* (Typ E3) umgesetzt ist und um die in Kapitel 5 vorgestellten Methoden erweitert wurde. Das Testsystem wird um die in Kapitel 5 entwickelten Methoden, wie dem Empfang und der Decodierung der UART-Signale des Bildeinspeiseadapters, erweitert.

A.1.3 CAN Oszilloskop

Für die empirische Bestimmung der Umsetzungszeit Δt_2 des Scheinwerfers wird das *DSO9254A* Oszilloskop der Keysight Technologies,

Tabelle A.2.: Technische Daten des HiL-Simulators, vergleiche [91]

Beschreibung	**Eigenschaften**
Modelltyp	Scalexio
Serielle Schnittstellen	RS232 Schnittstelle mit Standard UART und Übertragungsgeschwindkeiten von bis zu 480.6 kBaud
Prozessor	Intel XEON® E3-1275v3 Taktung: 3.5 GHz Anzahl Kerne: 4 (3 für Modellberechnung, 1 für z.B. Host Kommunikation)
Arbeitsspeicher	16 GB RAM

INC. verwendet. Die technischen Daten können der nachfolgenden Tabelle A.3 entnommen werden.

Tabelle A.3.: Technische Daten des Oszilloskops, vergleiche [92]

Beschreibung	**Eigenschaften**
Modellname	DSO9254A, *Keysight Technologies, Inc.*
Anzahl Kanäle	4
Bandbreite	2, 5 GHz
Analoge Abtastrate (4-Kanäle)	10 GSa/s
Standard Speicher (4-Kanäle)	20 Mpts
Protokolle	I^2C, SPI, JTAG, UART/RS-232, Flexray, CAN, LIN, u.a.

A.2 PROJEKTOREN UND MESSMITTEL

Für die experimentellen Untersuchungen mit holographischer Folie in Kapitel 4.2 kommen nachfolgend aufgeführte Messmittel und Materialien zum Einsatz.

A.2.1 LEUCHTDICHTEKAMERA

Die Leuchtdichtekamera *LMK 5 color* der TECHNOTEAM BILDVERARBEITUNG GMBH wird zur Messung der resultierenden Leuchtdichte der holographischen Folie genutzt. Ein Auszug aus dem Datenblatt kann der nachfolgenden Tabelle A.4 entnommen werden.

Tabelle A.4.: Technische Daten der Leuchtdichtekamera, vergleiche [93]

Beschreibung	**Eigenschaften**
Bezeichnung	LMK 5 color
Auflösung	1380 x 1030 Pixel
Messzeiten	100 s − 15 s
Dynamikbereich	1 : 1.000.000 ($\sim$ 140 dB)
Spektrale Anpassung	Durch Vollglasfilter an die $V(\lambda)$-Funktion angepasst zur Leuchtdichte und Farbmessung

Die LMK wurde für die Messungen der holographischen Folie zusammen mit einem 1000x *Haida Slim PRO II MC* Neutraldichtefilter verwendet, der für die Messungen in dieser Arbeit kalibriert wird. Die technischen Daten finden sich in der nachfolgenden Tabelle A.5.

Tabelle A.5.: Technische Daten des Neutraldichtefilters, vergleiche [94]

Beschreibung	**Eigenschaften**
Bezeichnung	Haida Slim PRO II MC
Durchmesser	58 mm
Dichtefaktor (Datenblatt)	ND3.0 (1000x)
Dichtefaktor (kalibriert)	815,5x

A.2.2 SPIEGELREFLEXKAMERA

Zur intrinsischen Kalibrierung der Komponenten und extrinsischen Kalibrierung des Versuchsaufbaus kommt eine Spiegelreflexkamera *CANON EOS 700D* zur Anwendung, vergleiche Tabelle A.6.

Tabelle A.6.: Technische Daten der Spiegelreflexkamera, vergleiche [95]

Beschreibung	**Eigenschaften**
Modellbezeichnung	Canon EOS 700D
Auflösung	5184 x 3456 Pixel
Sensortyp	CMOS
Sensorgröße	$22,3 \times 14,9$ mm

A.2.3 SPEKTROPHOTOMETER

Zur Messung des elektromagnetischen Spektrums des Frontprojektors kommt der Spektrophotometer *CL-500A* der KONICA MINOLTA, INC. zum Einsatz, vergleiche Tabelle A.7.

Tabelle A.7.: Technische Daten des Spektrometers, vergleiche [96]

Beschreibung	Eigenschaften
Modellbezeichnung	Beleuchtungsstärke Spektrophotometer CL-500A
Wellenlängenbereich	360 bis 780 nm
Ausgabe der Wellenlänge	1 nm
spektrale Bandbreite	10 nm (halbe Bandbreite)
Messbereich	0, 1 bis 100.000 lx
Genauigkeit	Beleuchtungsstärke E_v: ±2 % ± 1 Ziffer des angezeigten Werts

A.2.4 FRONTPROJEKTION

Für die experimentelle Evaluation des Konzepts mit holographischer Folie wird für die Frontprojektion ein *Optoma W304M* verwendet, vergleiche A.8.

Tabelle A.8.: Technische Daten des Frontprojektors, vergleiche Tabelle [97]

Beschreibung	Eigenschaften
Modellbezeichnung	W304M
Projektionstechnologie	Single 0.65” WXGA DC2 DMD chip DLP® Technologie von Texas Instruments
Auflösung	WXGA 1280 x 800
Helligkeit	3100 ANSI Lumen
(dynamischer) Kontrast	10, 000 : 1

A.2.5 RÜCKPROJEKTION

Für die experimentelle Evaluation des Konzepts mit holographischer Folie wird für die Rückprojektion ein *EPSON EH-TW6100* verwendet, vergleiche Tabelle A.9.

Tabelle A.9.: Technische Daten des Projektors für die Rückprojektion, vergleiche [98]

Beschreibung	Eigenschaften
Modellbezeichnung	EH-TW6100
Projektionstechnologie	3LCD-Technologie
Auflösung	1920 x 1080 Pixel
Helligkeit	2.300 Lumen
(dynamischer) Kontrast	40.000 : 1

A.2.6 HOLOGRAPHISCHE FOLIE

Für die prototypische Umsetzung und experimentelle Untersuchung steht ein holographischer Diffusor mit nachfolgender Charakteristik zur Verfügung.

Die holographisch beschriebene Folie hat eine Abmessung von 195 mm × 130 mm, besteht aus 16 RGB-belichteten Pixeln pro Quadratmillimeter und ist zur einfacheren Handhabung auf einer 3 mm starken Glasplatte aufgebracht [46].

Abbildung A.1 zeigt die Charakteristik für zwei unterschiedliche Beobachtungs und Auftreffwinkel (Winkeldefinition siehe Abbildung 4.1). Die bereitgestellten Daten zeigen die spektrale Effizienz verglichen mit einem weißen Papier für eine Weißlichtquelle. Zu erkennen ist die starke

Abnahme der Effizienz von Grün zu Blau. Daten bereitgestellt durch [99].

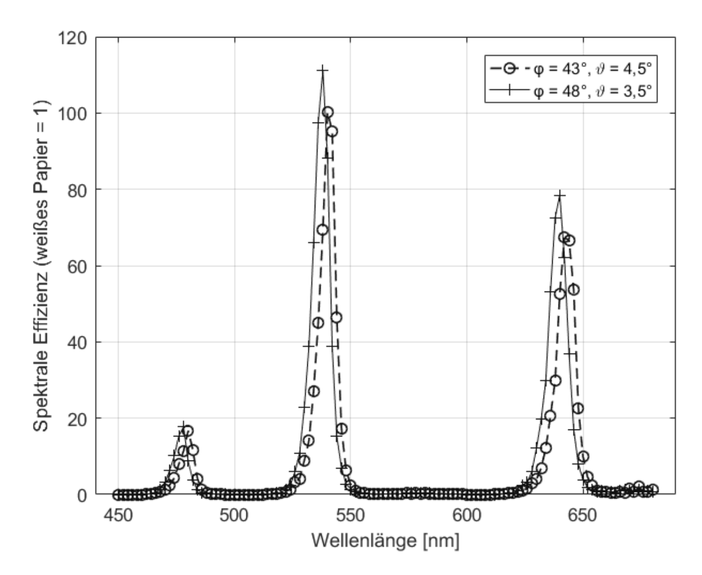


Abbildung A.1.: Spektrale Effizienz im Zentrum des holographischen Diffusors im Vergleich zu einem weißen Papier. Daten bereitgestellt durch [99]

Publikationsliste

Konferenz- und Journalbeiträge

Teile dieser Arbeit und deren Ergebnisse wurden bereits in den folgenden Konferenz- oder Journalbeiträgen veröffentlicht. Die Veröffentlichungen sind ebenfalls im Literaturverzeichnis aufgeführt.

- Strebel, S.; Neumann, C.: Dynamic Glare Simulation in Virtual Night Driving, In: *Proceedings of DSC 2018 Europe VR Driving Simulation Conference & Exhibition*, 2018
- Strebel, S.; Neumann, C.: Creating high contrast in virtual night driving, In: *Advanced Optical Technologies*, 2018
- Strebel, S.; Neumann, C.: Durchgängige simulative Evaluierung von Lichtfuntionen, In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: 6.VDI-Tagung*, 2018
- Strebel, S.; Neumann, C.: Simulative Absicherung von lichtbasierten Fahrerassistenzfunktionen, In: *7. AutoTest Fachkonferenz: Test von Hardware und Software in der Automobilentwicklung*, 2018

Patentanmeldungen

Auf Basis von Erfindungsmeldungen sind folgende Patentanmeldungen durch eine beauftragte Anwaltskanzlei formuliert und beim Patentamt eingereicht worden:

- Strebel, S.; Söhner, S.; Saralajew, S.: Patentschrift: Verfahren zum Bewerten eines Scheinwerfers. 2016, DE 102016109030 A1

- STREBEL, S.; SÖHNER, S.; SARALAJEW, S.: Patentschrift: Verfahren zur Lageüberprüfung charakteristischer Punkte in Lichtverteilungen. 2016, DE 102016109027 A1, US 10241000 B2
- STREBEL, S.; SÖHNER, S.; MATES, S.: Patentschrift: Verfahren und System zum Betreiben einer 3D-Brille mit Blendeigenschaft. 2016, DE 102016112326 A1
- STREBEL, S.; MIEMIETZ, S.; CHAMSEDDINE, Y.: Patentschrift: Anordnung zur fahrsituativen Simulation von Blendungseffekten. 2017, DE 102017204350 B3
- STREBEL, S.; NEUMANN, C.: Patentschrift: Anordnung zur fahrsituativen Simulation von Blendungseffekten oder blendungsähnlichen Effekten. 2017, DE 102017204435 A1
- STREBEL, S.: Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zur synchronen Einspeisung an einem Fahrzeugprüfstand. 2018, DE 102018120121 B3
- STREBEL, S.: Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zur Überwachung an einem Fahrzeugprüfstand. 2018, DE 102018120119 A1

Betreute Abschluss- und Studienarbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Doktorarbeit wurden die nachfolgend aufgelisteten studentischen Arbeiten betreut:

Abschlussarbeiten:

- BECHER, LOUISA: Untersuchung einer Kameraeinspeisung am Hardware-in-the-Loop Testsystem, Duale Hochschule Baden-Württemberg, Bachelorarbeit, 2019
- BOSSLER, MAXIMILIAN: Kalibrierung und Evaluierung eines Versuchsaufbaus zur realitätsnahen Visualisierung von Blendsituationen, Duale Hochschule Baden-Württemberg, Bachelorarbeit, 2018
- BRAUTMEIER, DANIEL: Evaluierung der Darstellung und Latenzzeit einer Matrix Lichtfunktion in einer virtuellen Umgebung, Fachhochschule Dortmund, Bachelorarbeit, 2017
- EHMKE, CLAAS: Simulation lichtbasierter Fahrerassistenzfunktionen, Technische Universität München, Bachelorarbeit, 2017
- WILD, JONAS: Erstellung einer Toolkette zur Integration des Fahrerassistenzsteuergeräts in eine virtuelle Simulationsumgebung, Duale Hochschule Baden-Württemberg, Bachelorarbeit, 2016

In Zusammenarbeit mit MACIEJ BONCLER wurde folgende studentische Arbeit betreut:

- BRAUTMEIER, DANIEL: Entwicklung einer Methode zur Applikation, Verifikation und Validierung der virtuellen Kamerabilddateneinspeisung an einem Hardware-in-the-Loop-Testsystem für Fahrerassistenzsysteme, Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, Masterarbeit, 2020

Studienarbeiten:

- BARTSCH, NICO: Aufbau und Evaluierung eines Versuchsstands zur Nachstellung von dynamischen Blendsituationen, Duale Hochschule Baden-Württemberg, Projektarbeit, 2018
- GÜNDOGAN, TUGRUL: Entwicklung einer Testumgebung zur E2E-Absicherung eines On-Board Chargers, Technische Hochschule Bingen Praxisarbeit, 2018
- BRAUTMEIER, DANIEL: Integration eines Fahrerassistenzsteuergeräts in eine virtuelle Umgebung, Fachhochschule Dortmund, Ingenieurmäßige Arbeit, 2017
- KUGLER, NOAH: Entwicklung einer Einspeiseschnittstelle für den MIB zur Reichweitenberechnung in der Elektromobilität, Duale Hochschule Baden-Württemberg, Praxisarbeit, 2017

SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

Lichttechnisches Institut Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

ISSN 2195-1152

Band 1 Christian Jebas
Physiologische Bewertung aktiver und passiver Lichtsysteme im Automobil.
ISBN 978-3-86644-937-4

Band 2 Jan Bauer
Effiziente und optimierte Darstellungen von Informationen auf Grafikanzeigen im Fahrzeug.
ISBN 978-3-86644-961-9

Band 3 Christoph Kaiser
Mikrowellenangeregte quecksilberfreie Hochdruckgasentladungslampen.
ISBN 978-3-7315-0039-1

Band 4 Manfred Scholdt
Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System.
ISBN 978-3-7315-0044-5

Band 5 André Domhardt
Analytisches Design von Freiformoptiken für Punktlichtquellen.
ISBN 978-3-7315-0054-4

Band 6 Franziska Herrmann
Farbmessung an LED-Systemen.
ISBN 978-3-7315-0173-2

Band 7 Simon Wendel
Freiform-Optiken im Nahfeld von LEDs.
ISBN 978-3-7315-0251-7

Band 8 Carmen Kettwich
Ablenkung im Straßenverkehr und deren Einfluss auf das Fahrverhalten.
ISBN 978-3-7315-0288-3

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar oder als Druckausgabe bestellbar.

Band 9 Steffen Michenfelder
Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren.
ISBN 978-3-7315-0301-9

Band 10 Celal Mohan Ögün
Surface wave driven molecular low pressure plasmas for general lighting.
ISBN 978-3-7315-0464-1

Band 11 Theresa Bonenberger
LED Farbmischung mit chaotischen Lichtleitern.
ISBN 978-3-7315-0480-1

Band 12 Michael Schöne
Diffraktive Optiken im Automobil: Achromatisierung, Athermalisierung, Formung von Scheinwerferlichtverteilungen.
ISBN 978-3-7315-0613-3

Band 13 Tobias Werner
Simulation, Aufbau und Charakterisierung von autostereoskopischen Display-Systemen im Fahrzeugbereich.
ISBN 978-3-7315-0617-1

Band 14 Christian Herbold
Entwicklung und Herstellung naturähnlich verzweigter Kühlkörper für LED-Systeme.
ISBN 978-3-7315-0635-5

Band 15 Carsten Gut
Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme.
ISBN 978-3-7315-0710-9

Band 16 Annie Shalom Samji Isaac Chandra
Intelligent Freeform Deformation for LED Illumination Optics.
ISBN 978-3-7315-0741-3

Band 17 Ingo Rotscholl
Spectral near field data of LED systems for optical simulations.
ISBN 978-3-7315-0750-5

Band 18 Inca Leopoldo Sayanca
Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei kamerabasierter Farbverteilungsmessung.
ISBN 978-3-7315-0830-4

Band 19 Benjamin Schulz
Weiterentwicklung der Beleuchtungseinheit LED-basierter Projektionssysteme.
ISBN 978-3-7315-0865-6

Band 20 Said Omerbegovic
Prädiktive Lichtfunktionen für volladaptive Scheinwerfersysteme.
ISBN 978-3-7315-0875-5

Band 21 Patric Jahn
Bewertungsmodell zur Evaluation hochauflösender, lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme.
ISBN 978-3-7315-1009-3

Band 22 Maximilian Barthel
Aufmerksamkeitslenkung mithilfe Innenraumbeleuchtung im Automobil.
ISBN 978-3-7315-1011-6

Band 23 Melanie Helmer
Methode zur Messung des Einflusses von Lichtimpulsen auf die visuelle Leistungsfähigkeit.
ISBN 978-3-7315-1013-0

Band 24 Marina Budanow
Entwicklung eines lichtbasierten Fahrerassistenzsystems.
ISBN 978-3-7315-1018-5

Band 25 Dennis Zimmermann
Verbesserung der Prozesskette zur Herstellung mikrostrukturierter Linsen für automobile Scheinwerfer.
ISBN 978-3-7315-1058-1

Band 26 Manuel Trierweiler
Detektion und Klassifizierung unterschiedlicher Bedeckungen auf Abschlussscheiben von LiDAR-Sensoren.
ISBN 978-3-7315-1200-4

Band 27 Johannes Reschke
Fahrerintentionserkennung zur lichtbasierten Kommunikation mit Fußgängern.
ISBN 978-3-7315-1185-4

Band 28 Steffen Strebel
Ein Beitrag zum simulationsbasierten Test von Lichtfunktionen.
ISBN 978-3-7315-1208-0

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

Die Durchführung von Lichtfunktionstests in Nachtfahrten ist im automobilen Entwicklungsprozess mit erheblichen Aufwänden verbunden und unterliegt Herausforderungen in Objektivität und Reproduzierbarkeit. In dieser Arbeit werden zwei Methoden entwickelt und evaluiert, um Wirkketten von Lichtfunktionen an simulationsbasierten Testsystemen zu integrieren und zu testen. Der Fokus liegt zunächst auf einem Ansatz zur effizienten Lichtnutzung für die Darstellung hoher Kontraste in virtuellen Nachtfahrten mit realer Fahrerassistenzkamera. Im Weiteren wird eine Testmethode erarbeitet, um pixelbasierte Lichtfunktionen an einem Hardware-in-the-Loop Testsystem basierend auf Metriken zu bewerten.

ISSN 2195-1152
ISBN 978-3-7315-1208-0

ISBN 978-3-7315-1208-0
9 783731 512080

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier